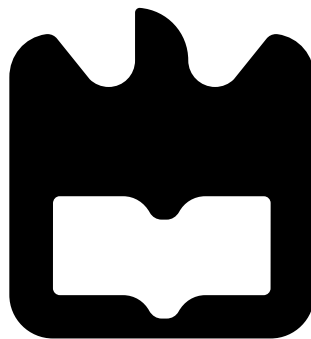




**Diana Filipa
da Silva Ferreira
Rodrigues**

**Sistema de despacho otimizado para sistemas
energéticos isolados**





**Diana Filipa
da Silva Ferreira
Rodrigues**

**Sistema de despacho otimizado para sistemas
energéticos isolados**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica de Rui Manuel Escadas Ramos Martins, Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Professor Doutor José Alberto Gouveia Fonseca

Professor Associado da Universidade de Aveiro

vogais

Professor Doutor José Augusto Almeida Pinheiro de Carvalho

Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Bragança

Professor Doutor Rui Manuel Escadas Ramos Martins

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador)

agradecimentos

Ao meu orientador, professor Rui Martins, o meu muito obrigada pelo acompanhamento, por todas as indicações dadas e por tudo o que me ensinou.

À Novabase, um muito obrigada pela oportunidade que me deram de crescer e de conhecer. Ao Paulo e ao Vítor, muito obrigada por tudo o que me ensinaram, pela maneira como me receberam e sempre lidaram e, acima de tudo, pelo voto de confiança. Ao Nuno, muito obrigada por tudo o que me ensinou e pela super motivação de sempre. Aos meus caros amigos *trainees*, obrigada pela força que sempre me deram, pelo excelente convívio e pela amizade! Aos restantes, obrigada pela boa disposição e pela forma como me acolheram.

Um enorme agradecimento para os meus três Rs, Ricardo D., Renato e Riscado. Companheiros ao longo destes cinco anos e amigos para eternidade, muito obrigada! Trago-vos sempre comigo.

Aos meus pais, por todo o suporte, pelo incansável e incondicional apoio, pela motivação em todos os momentos. Para eles, todo o agradecimento é pouco. Muito obrigada!

À minha irmã, Ana, um agradecimento especial por todo o apoio e motivação. Irmão é sempre irmão! Ao meu cunhado que, apesar de não ser irmão, é como se fosse. E à minha sobrinha preferida, Margarida, muito obrigada pelos inocentes e sinceros sorrisos, que tanta motivação me deram na fase final!

Um muito obrigada especial ao Ricardo V., pela paciência que teve ao longo de todo o percurso, por ter sido o meu pilar nos momentos mais frágeis, pela preocupação, pela motivação dada nos melhores momentos e por todo o carinho. Essencialmente, muito obrigada por tudo!

Muito obrigada à minha família, por todo o apoio e toda a ternura.

Um agradecimento a todos os meus amigos que, de alguma forma, tornaram este percurso mais luminoso. Em especial, obrigada ao Tiago C., pelo incentivo na escolha do curso e por toda a motivação!

Finalmente, à Universidade de Aveiro e, em especial, ao DETI, muito obrigada!

Resumo

A energia elétrica constitui um serviço indispensável à sociedade. As evoluções tecnológicas ocorridas, essencialmente, durante o último século, juntamente com o aumento da população mundial, contribuíram para o aumento exponencial do consumo de eletricidade.

Atualmente, os combustíveis fósseis ainda constituem uma percentagem considerável na produção de energia elétrica a nível mundial. Este facto, particularmente em sistemas energeticamente isolados, causa impactos, quer económicos quer ambientais, significativos no país, devido ao seu elevado custo e à poluição que provoca.

No sentido de diminuir os impactos causados pelos combustíveis fósseis, torna-se essencial integrar fontes de energia renovável na produção de energia elétrica. Apesar de se impulsionar a economia do país e reduzir o impacto ambiental, é necessário solucionar os problemas da instabilidade da rede elétrica, causados pelas constantes oscilações destas fontes de energia. Para tal, criou-se um Sistema de Despacho (SD) capaz de otimizar e gerir, em tempo real, a produção de energia térmica, pelos geradores termoelétricos, em função do consumo horário. Além disso, o sistema cumpre um conjunto de restrições e reduz o custo de produção de energia para um valor tão reduzido quanto possível.

O SD é constituído por três componentes principais, sendo cada um responsável por uma função. O pré-despacho efetua o comissionamento dos geradores, restringindo o conjunto dos geradores existentes no sistema. O despacho económico é responsável por aumentar a potência dos geradores em funcionamento e por ligar geradores, pelo método dos Multiplicadores de *Lagrange*, seguido do método iterativo de *Lambda*. Por outro lado, o desligamento/redução de potência desliga os geradores e reduz a potência dos mesmos.

O processo de despacho foi implementado e testado, para vários cenários de simulação compostos por dados reais, quer de produção, quer de consumo, registados na ilha de Santiago, em Cabo Verde.

Os testes aplicados aos algoritmos desenvolvidos permitiram concluir a eficiência e a aplicabilidade dos mesmos, no contexto de sistemas energéticos isolados.

Abstract

The electrical energy is a necessary service to society. During the last century, there was a huge technological evolution that, together with the increasing of the world population, contributed to an exponential increment of electricity consumption.

Currently, the fossil fuels are a relevant part of the world electrical energy production. Specially in isolated energy systems, this causes many significant environmental and economical impacts, due to its costs and the pollution.

To decrease the impacts caused by the fossil fuels, it becomes essential to integrate renewable energy sources in electrical energy production. Despite this boosts the country economy and reduces the environmental impacts, it's required to solve the problems of the instability of the electrical network, caused by the oscilations of this sources. For that, a Power Dispatch System (PDS) able to optimize and manage in real-time the thermal energy production from thermoelectric generators, according to consumption per hour, was created. Furthermore, the system fulfills a set of constraints and reduces the energy production costs to a value as small as possible.

There are three mainly components that together create the PDS. The pre-dispatch performs the comissioning of the generators and limits the system generators set. The economical dispatch is responsible to increase the power provided by the generators in operation and to turn on generators, using the *Lagrange* Multipliers method followed by the *Lambda* iteration method. On the other hand, the shutdown/power reduction switches off the generators and reduces its generated power. The dispatch process was implemented and tested for several simulation scenarios consisting of real production and consumption data recorded on the Santiago island, in Cabo Verde.

The tests applied to the developed algorithms allowed to conclude their efficiency and applicability in the context of isolated energy systems.

Conteúdo

Conteúdo	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
Acrónimos	vii
1 Introdução	1
1.1 Contexto	2
1.2 Objetivos e Motivação	3
1.3 Aplicações	4
1.4 Organização do documento	4
2 Estado da Arte	5
2.1 Energia elétrica	5
2.2 Sistemas de Energia Elétrica	9
2.2.1 Sistema Elétrico de Portugal	10
2.2.2 Sistema Elétrico de Cabo Verde	11
2.3 Sistemas de despacho energético	13
2.3.1 Sistema continental (Portugal)	13
2.3.2 Sistema isolado (Cabo Verde)	14
2.4 Redes elétricas inteligentes (<i>Smart Grids</i>)	15
2.5 Resumo	17
3 Arquitetura do Sistema	19
3.1 Sistema de Despacho (SD)	19
3.1.1 Visão geral	20
3.1.2 Dados de entrada	20
3.1.3 Dados de saída	22
3.2 Resumo	22

4	Processo de Despacho	23
4.1	Despacho Energético	23
4.1.1	Descrição e diagrama de fluxo	25
4.2	Pré-despacho	26
4.2.1	Descrição e diagrama de fluxo	26
4.3	Despacho Económico	30
4.3.1	Análise qualitativa entre algoritmos	31
4.3.2	Análise quantitativa entre algoritmos	32
4.3.3	Método dos Multiplicadores de Lagrange	34
4.4	Desligamento/Redução de potência	39
4.4.1	Descrição e diagrama de fluxo	40
4.5	Resumo	44
5	Resultados	45
5.1	Dados de produção	45
5.2	Dados de consumo	48
5.3	Reserva girante	50
5.4	1º Cenário: Produção convencional (apenas)	50
5.4.1	Dia chuvoso	51
5.4.2	Dia seco	55
5.5	2º Cenário: Produção renovável a 10%	60
5.5.1	Dia chuvoso	60
5.5.2	Dia seco	62
5.6	3º Cenário: Produção renovável a 50%	64
5.6.1	Dia chuvoso	64
5.6.2	Dia seco	67
6	Conclusão e Trabalho Futuro	71
6.1	Conclusão	71
6.2	Trabalho Futuro	73
	Bibliografia	75
A	Dedução matemática do método dos Multiplicadores de <i>Lagrange</i>	79

Lista de Figuras

2.1	Produção fabril após a Revolução Industrial	6
2.2	Fábrica destruída na Segunda Guerra Mundial	7
2.3	Consumo mundial de energia elétrica, por pessoa	8
2.4	Estrutura de um Sistema de Energia Elétrica	9
2.5	Central Tejo	10
2.6	Centrais elétricas de Cabo Verde	12
2.7	Centros de Despacho em Portugal	14
a	Centro de Despacho da REN	14
b	Centro de Despacho da EDP	14
2.8	Central Única de Palmarejo	15
2.9	Rede Inteligente	16
3.1	Visão geral do Sistema de Despacho (SD)	20
3.2	Central termoeétrica da ilha de Santiago	20
3.3	Parques de Energias Renováveis	21
a	Parque Eólico da Ilha de Santiago	21
b	Parque Fotovoltaico da Ilha do Sal	21
4.1	Diagrama de Fluxo do Processo de Despacho	25
4.2	Diagrama de Fluxo do Processo de Pré-despacho	27
4.3	Diagrama de Fluxo do Processo de Despacho Económico	38
4.4	Diagrama de Fluxo do Processo de Desligamento/Redução de Potência . .	41
5.1	Diagrama de Carga de um dia tipicamente chuvoso	48
5.2	Diagrama de Carga de um dia tipicamente seco	49
5.3	Dia chuvoso, reserva a 5%, produção renovável a 0%	53
5.4	Dia chuvoso, reserva a 30%, produção renovável a 0%	54
5.5	Dia seco, reserva a 5%, produção renovável a 0%	58
5.6	Dia seco, reserva a 30%, produção renovável a 0%	59
5.7	Dia chuvoso, reserva a 5%, produção renovável a 10%	60
5.8	Dia chuvoso, reserva a 30%, produção renovável a 10%	61
5.9	Dia seco, reserva a 5%, produção renovável a 10%	62
5.10	Dia seco, reserva a 30%, produção renovável a 10%	63

5.11	Dia chuvoso, reserva a 5%, produção renovável a 50%	66
5.12	Dia chuvoso, reserva a 30%, produção renovável a 50%	67
5.13	Dia seco, reserva a 5%, produção renovável a 50%	68
5.14	Dia seco, reserva a 30%, produção renovável a 50%	69

Lista de Tabelas

4.1	DAR relativo aos algoritmos de despacho económico	33
5.1	Dados dos geradores da Ilha de Santiago	46

Acrónimos

a.C.	antes de Cristo
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CNE	Companhia Nacional de Eletricidade
CPE	Centrais de Produção de Energia
DAR	Decision Analysis and Resolution (Análise de Decisão e Resolução)
EDP	Energias de Portugal
ELECTRA	Empresa de Eletricidade e Água, SARL
E&U	Energy & Utilities
GESTO	Gesto Energy Consulting
I&D	Investigação & Desenvolvimento
IST	Instituto Superior Técnico
MAT	Muito Alta Tensão
MT	Média Tensão
PC	Previsão do Consumo
PDS	Power Dispatch System
PIB	Produto Interno Bruto
PPC	Previsão de Produção Convencional
PPR	Previsão de Produção Renovável
PT	Posto de Transformação

QoE	Qualidade de Energia
QoS	Qualidade de Serviço
REN	Rede Elétrica Nacional
SD	Sistema de Despacho
SEH	Sistema Elétrico Híbrido

Capítulo 1

Introdução

O **despacho** consiste na gestão e controlo da produção de energia convencional pelas Centrais de Produção de Energia (CPE), tendo em conta a procura da mesma, seja por clientes particulares ou comerciais. Nos últimos tempos, o problema do despacho tem sido alvo de discussão no sector das *Energy & Utilities* (E&U). Com o aumento do consumo de energia e a integração de fontes renováveis de energia na sua produção, há uma tendência para o aperfeiçoamento e adequação do processo de despacho, de modo a suprir as necessidades energéticas, de preferência com custos de produção tão reduzidos quanto possível, e compensar as instabilidades causadas pela oscilação e intermitência da energia proveniente das fontes renováveis. Estes factos levaram ao aparecimento do conceito de **despacho económico** e ao estudo e desenvolvimento de algoritmos e métodos complexos para a solução deste tipo de problemas.

O despacho constitui um problema tanto mais relevante, na economia de um país, quanto maior for a dependência da importação de combustíveis fósseis utilizados para gerar energia e quanto maior for a taxa de penetração de fontes de energia renovável, nesse país. Estas duas particularidades são, tipicamente, características de **sistemas energeticamente isolados**, como é o caso de uma ilha ou um arquipélago. Torna-se, então, imprescindível solucionar este problema, de modo a auxiliar não só no crescimento da economia do país, como também no melhoramento da Qualidade de Serviço (QoS) da distribuição de energia e na redução do impacto ambiental causa pela produção da mesma.

Este capítulo contém uma breve contextualização à temática desta dissertação. Nele descrevem-se os objetivos propostos, aliados à motivação para a realização da mesma. Para além do referido, inclui-se uma descrição sucinta da empresa onde o projeto, no qual se inclui o tema desta dissertação, está a ser desenvolvido e enumeram-se algumas possíveis aplicações práticas para o mesmo. Por último, são definidas tanto a estrutura do documento, bem como a sua organização.

1.1 Contexto

Desde o aparecimento da energia elétrica no século XVIII, houve uma evolução exponencial da tecnologia utilizada até então. Esta mudança levou, consequentemente, a uma tendência para o aumento do consumo de energia elétrica em todo o mundo, desde os meios de transporte aos meios de comunicação, passando pelas grandes fábricas [1].

A energia nuclear e os combustíveis fósseis, como o petróleo, o carvão e o gás natural, são os atuais responsáveis pela produção da maioria da energia elétrica a nível mundial (em média, 87% [2]). Para além destes serem fontes de energia não-renovável, são também muito poluentes, o que provoca um enorme impacto ambiental. Por isto, é evidente a necessidade do aumento de investimento em energias renováveis e não-poluentes para a produção de energia elétrica. Com o aumento da utilização de fontes de energia renovável surgem alguns problemas na gestão e operação da rede elétrica, nomeadamente devido à intermitência de algumas fontes e à consequente instabilidade que estas causam, quer seja no valor de frequência ou no valor de tensão da rede.

Atualmente, em Portugal, predomina a produção centralizada de eletricidade, isto é, existem vários locais em território nacional onde se centra a geração de energia elétrica, a partir de várias fontes de energia, entre as quais a água, o vento, a biomassa e os combustíveis fósseis, a qual é, posteriormente, transportada e distribuída até ao consumidor final, estando acessível em quase todos os pontos do país [3].

No caso de sistemas energéticos isolados, como o são as ilhas e os arquipélagos (Cabo Verde, em específico), há também centrais elétricas que produzem a maioria da energia. No entanto, estas estão fortemente dependentes da importação de combustíveis fósseis, o que acarreta custos muito elevados [4] e, consequentemente, impede a competitividade quer no mercado interno quer no mercado externo [5].

Para reduzir os efeitos dos problemas enunciados anteriormente, torna-se, então, necessário aumentar a integração de fontes de energia renovável na produção de energia elétrica. Assim, e para garantir as condições de segurança de operação da rede, pretende criar-se um sistema de despacho energético que otimize, em tempo real, a gestão e o controlo da produção convencional de energia em sistemas energeticamente isolados. Para além disto, o sistema de despacho deve fazer o balanço entre a produção e o consumo de energia, de modo a reduzir, ou, se possível, eliminar, os impactos causados pelas oscilações da energia proveniente de fontes renováveis.

Ao longo desta dissertação, serão feitas análises comparativas entre sistemas energeticamente isolados e não-isolados (continentais), de modo a se verificarem as semelhanças e diferenças entre os mesmos. A título de exemplo, Portugal é referido como um sistema continental e Cabo Verde, por razões óbvias, como um sistema isolado. A solução desenvolvida para o problema do despacho será, no final, aplicada à ilha de Santiago em Cabo Verde (ilha onde fica situada a cidade da Praia, capital do arquipélago) pelo que, durante o documento, quer o sistema elétrico de Cabo Verde quer a sua descrição como um sistema isolado terão maior relevância.

Esta dissertação foi desenvolvida no âmbito da empresa Powergrid, empresa participada pela Novabase Capital.

Uma das principais preocupações da Novabase¹ é implementar estratégias de desenvolvimento sustentável, como por exemplo a eficiência energética. Assim, surgiram duas *startups* participadas pela Novabase Capital: Powergrid e Powerdata. A Powergrid é a empresa que suportou o desenvolvimento desta dissertação.

Na Powergrid, além do fornecimento de infraestruturas para *smart grids*, o foco centra-se na criação de novos sistemas técnicos de gestão e controlo, e na adaptação dos existentes, como resultado da introdução de inteligência e de comunicações nas redes de energia. Através da utilização de tecnologias *open source* e de referência, comunicações integradas e sistemas de monitorização inteligentes, esta *startup* procura fornecer ao consumidor informações sobre consumos em tempo real, de modo a aumentar a sua sensibilidade e receptividade para a alteração dos respetivos hábitos. A solução permite também mais controlo sobre a rede de baixa tensão, abrindo caminho para inúmeras aplicações inovadoras.

1.2 Objetivos e Motivação

Para esta dissertação foram definidas algumas etapas relacionadas com Investigação & Desenvolvimento (I&D). Para além da redução dos custos de produção de energia elétrica, pretende cumprir-se os seguintes objetivos:

- Monitorização, otimização e maximização da exploração e da produção de parques eletroprodutores;
- Gestão, em tempo real, da produção convencional de energia, com base na previsão do consumo de energia elétrica;
- Maximização da segurança do sistema.

As grandes motivações para a realização desta dissertação estão relacionadas com o facto deste ser um projeto que tira partido da disrupção existente no mercado e ter elevada probabilidade de vir a ser implementado em contexto real. Para além disso, o desenvolvimento de uma solução que permite melhorar a qualidade de um serviço cada vez mais essencial para a sociedade é uma aposta de valor elevado.

¹<http://www.novabase.pt/pt/Novabase/Pages/Historia.aspx>

1.3 Aplicações

O trabalho desenvolvido com base nesta temática dará lugar a um sistema de despacho capaz de otimizar a produção de energia de um sistema energético isolado. Este sistema será vantajoso para toda a rede elétrica do sistema onde for implementado pois permitirá, entre outros, a sua estabilização e facilitará a gestão, o controlo e a monitorização da mesma.

Numa primeira fase, prevê-se que este sistema seja implementado em três das dez ilhas que constituem Cabo Verde. Para além disso, com pequenas adaptações, este poderá ser a base de implementação de um sistema semelhante noutras ilhas ou noutros sistemas energéticos isolados.

1.4 Organização do documento

Esta dissertação está dividida em capítulos, os quais estão organizados da seguinte forma:

Capítulo 2 Contém uma introdução sobre a história da eletricidade, assim como a comparação entre os sistemas energéticos de Portugal e de Cabo Verde. Demonstra-se a necessidade de tornar mais eficiente a produção de energia, reduzindo os seus custos e assegurando a sua qualidade e a sua segurança. São referidos alguns argumentos para a integração de redes inteligentes, principalmente em sistemas isolados, de modo a colmatar alguns dos problemas inerentes à penetração de fontes de energia renovável na rede.

Capítulo 3 Explica a arquitetura do Sistema de Despacho (SD) que será desenvolvido e implementado e mostra a visão geral do mesmo. Descrevem-se todos os blocos constituintes, separados por dados de entrada e dados de saída, e explicam-se as interações entre os mesmos, de modo a demonstrar o funcionamento global do sistema.

Capítulo 4 Apresenta uma explicação detalhada dos algoritmos utilizados, a sua aplicação no contexto do projeto e uma análise comparativa entre esses métodos e outros estudados. Contém o desenvolvimento e a implementação dos processos que compõem os algoritmos escolhidos, nomeadamente o pré-despacho, o despacho económico e o desligamento/redução de potência de geradores.

Capítulo 5 Descreve os cenários de simulação criados, tendo em conta os dados de produção, os dados de consumo e a reserva girante. São apresentados os resultados derivados da execução de todo o processo de despacho e efetuadas as respetivas análises.

Capítulo 6 Refere as conclusões finais relativas ao projeto, bem como algumas sugestões de trabalho futuro, com o objetivo de dar continuidade ao projeto.

Apêndice A Detalha a dedução matemática do método dos Multiplicadores de *Lagrange*.

Capítulo 2

Estado da Arte

O presente capítulo contém uma breve introdução sobre o aparecimento da eletricidade. O sistema de energia elétrica é descrito, bem como o modelo da rede de energia elétrica e as suas constantes modificações. Compara-se o sistema energético de Portugal com o de Cabo Verde, no sentido de mostrar as semelhanças e diferenças entre sistemas energéticos não-isolados e isolados, respetivamente. É demonstrada a necessidade de melhorar os mecanismos de operação da rede dos sistemas isolados, de modo a tornar mais eficiente a produção de energia, reduzir os seus custos e assegurar a sua qualidade e a sua segurança. São referidos alguns argumentos para a integração e desenvolvimento de redes inteligentes, principalmente em sistemas isolados, com a finalidade de gerir, controlar e monitorizar toda a rede, convergindo para a solução de problemas, tais como os provenientes da penetração de fontes de energia renovável.

2.1 Energia elétrica

Os primeiros contactos com a energia elétrica remontam a milhares de anos a.C., quando as pessoas se aperceberam dos choques provenientes do peixe-elétrico [6]. No entanto, o aparecimento de conhecimentos sobre a mesma apenas surgiram em meados do séc. XVIII, quando Benjamin Franklin realizou uma vasta pesquisa sobre a eletricidade [7], e a primeira central elétrica foi inaugurada apenas em 1882 (séc. XIX), em Pearl Street, Nova Iorque. Este acontecimento marcou, então, o início da era da energia elétrica. [8]

A eletricidade permitiu o aparecimento de novas ferramentas fabris e industriais, como o motor de combustão e a locomotiva elétrica, o que, consequentemente, influenciou o modo de vida e a mentalidade da sociedade. Estas alterações levaram a uma mecanização a nível industrial, nomeadamente nos meios de transporte, meios de comunicação e produção fabril (figura 2.1), e impulsionaram a chamada Era da Revolução Industrial [1].

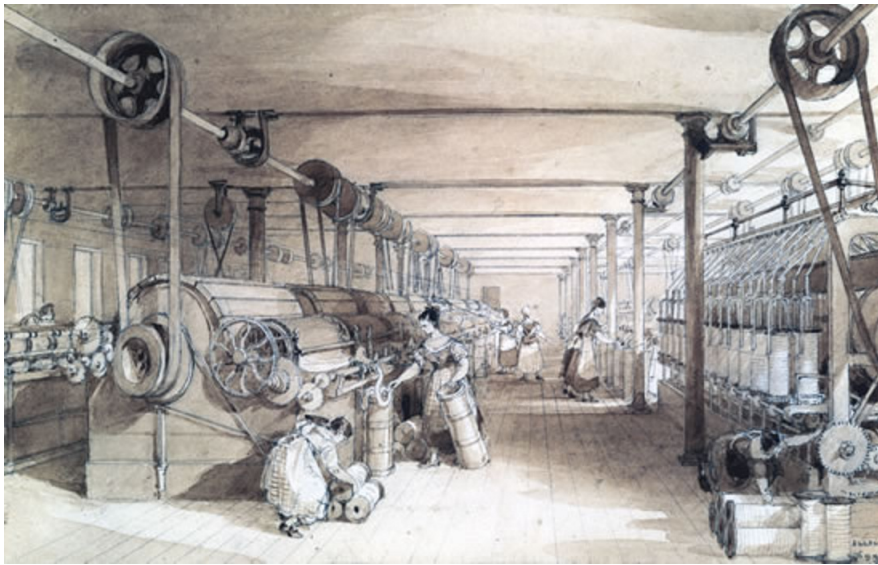


Figura 2.1: Produção fabril após a Revolução Industrial [9]

As primeiras centrais elétricas eram acionadas por máquinas a vapor e geravam corrente contínua através de dínamos. Com a invenção do transformador (permite a variação do valor da tensão para níveis mais adequados ao transporte, distribuição e ao próprio consumo de energia) e do motor de indução (máquina elétrica de corrente alternada, vantajoso em relação ao motor de corrente contínua no que diz respeito a acionamentos elétricos) surgiu a corrente alternada, que teve uma adesão generalizada em detrimento da corrente contínua, apesar dos atritos ocorridos entre os defensores dos dois tipos de corrente. A corrente alternada permitiu, então, o desenvolvimento das centrais elétricas e das redes de distribuição associadas. Posteriormente, por volta dos anos 20 do séc. XX, apareceram as redes de transporte de Alta Tensão (AT) e Muito Alta Tensão (MAT), que ligaram todos os centros de produção. Estas redes permitiram o aproveitamento de recursos energéticos distantes, como os recursos hidroelétricos ou o carvão, e o aumento contínuo da potência das centrais, de modo a tirar partido das economias de escala¹. [8]

A Segunda Guerra Mundial destruiu a maioria dos sistemas elétricos na Europa (figura 2.2), o que levou, após o seu final e na maioria dos países europeus, à constituição de empresas verticalmente integradas² (devido ao carácter estratégico e à natureza do serviço público de abastecimento de energia elétrica) para assegurar a produção, o transporte e também a distribuição de energia. [8]

¹Otimização do processo de produção, no sentido de maximizar a utilização dos fatores produtivos envolvidos no processo, minimizar os custos de produção e aumentar os bens e serviços. Numa empresa, a economia de escala ocorre quando se aumenta a produção global sem aumentar os custos da mesma, totalmente ou na mesma proporção.

²Empresas que são expandidas em diferentes etapas do seu processo de produção e têm completa flexibilidade em tomar decisões, nomeadamente, acerca do investimento, da produção e da distribuição. Cada etapa envolve a produção de um produto diferente e a combinação de todos os produtos satisfaz uma necessidade.



Figura 2.2: Fábrica destruída na Segunda Guerra Mundial [10]

Nos anos 60 do séc. XX, houve uma centralização dos centros produtores, o que levou ao aparecimento das primeiras centrais nucleares (centrais de produção de energia elétrica que utilizam energia nuclear para a sua geração). Após o primeiro choque petrolífero, na década de 70, o modelo de centralização tem sido constantemente alterado, com a intenção de liberalizar o mercado de eletricidade, o que apenas foi possível devido à evolução tecnológica e à inovação organizacional. A evolução tecnológica resultou do aparecimento de novas tecnologias de produção mais eficientes e com menores custos, nomeadamente, a turbina a gás³, o ciclo combinado⁴, a cogeração⁵ e a produção através das energias renováveis. Este fator levou, ainda, à redução das economias de escala ou ao aproveitamento de recursos renováveis, o que contribui para a expansão da produção descentralizada e, consequentemente, tem um significado relevante na satisfação do consumo de energia elétrica. A inovação organizacional derivou da liberalização que transformou o modelo monopolista, no sentido de alcançar ganhos na eficiência e redução nos custos, para benefício dos consumidores, embora outros afirmem que os ganhos são, maioritariamente, para benefício dos acionistas das referidas organizações. [8]

A rede elétrica, que permite ter paralelamente produção e importação, foi um fator determinante na redução do monopólio de produção de eletricidade. Assim, a tecnologia inovadora que foi desenvolvida, designadamente *software* de última geração e equipamento

³Motores térmicos que efetuam a conversão da energia proveniente da combustão de um combustível, normalmente, gás natural ou óleo *diesel*, em potência elétrica.

⁴Tecnologia onde coexiste uma turbina a gás, que efetua a combustão de gás natural, e uma a vapor, que utiliza a energia resultante desta última, transforma-a em energia mecânica de rotação e transmite-a a um alternador, onde é, posteriormente, convertida em energia elétrica.

⁵Combinação de produção de energia elétrica e térmica.

informático, juntamente com o estudo da eletrónica de potência⁶, permitiu enormes melhorias tanto no planeamento e operação das redes elétricas, como no controlo da energia elétrica em todas as fases do seu ciclo, seja na sua produção, transporte, distribuição e até no seu consumo. Além disso, a política ambiental tem vindo a ter um papel cada vez mais significativo e uma maior influência, quer nas *Energy & Utilities* (E&U) quer nos consumidores, o que condiciona bastante o sector energético e proporciona uma evolução no desenvolvimento sustentável. A título de exemplo, ao nível da produção são feitas exigências ambientais, com o objetivo de reduzir as emissões de gases tóxicos e poluentes, principalmente dióxido de carbono e derivados do enxofre, e, assim, combater o efeito de estufa e, conseqüentemente, o aquecimento global. Por outro lado, o consumidor é alvo de pressões, designadamente, por parte das E&U e da autoridade governante, que impõem taxas tanto maiores quanto maior o consumo, de modo a incentivar a política de consumo sustentável. Devido a estes fatores, a eficiência energética é cada vez mais um requisito na produção e consumo de energia, o que causou uma forte pressão nas concessionárias para a internacionalização dos custos ambientais. [8]

Em suma, o crescimento substancial da população mundial nos últimos 60 anos e a evolução da tecnologia utilizada a partir da Revolução Industrial provocaram um aumento exponencial no consumo global de energia elétrica, como se pode verificar na figura 2.3 [11, 12].

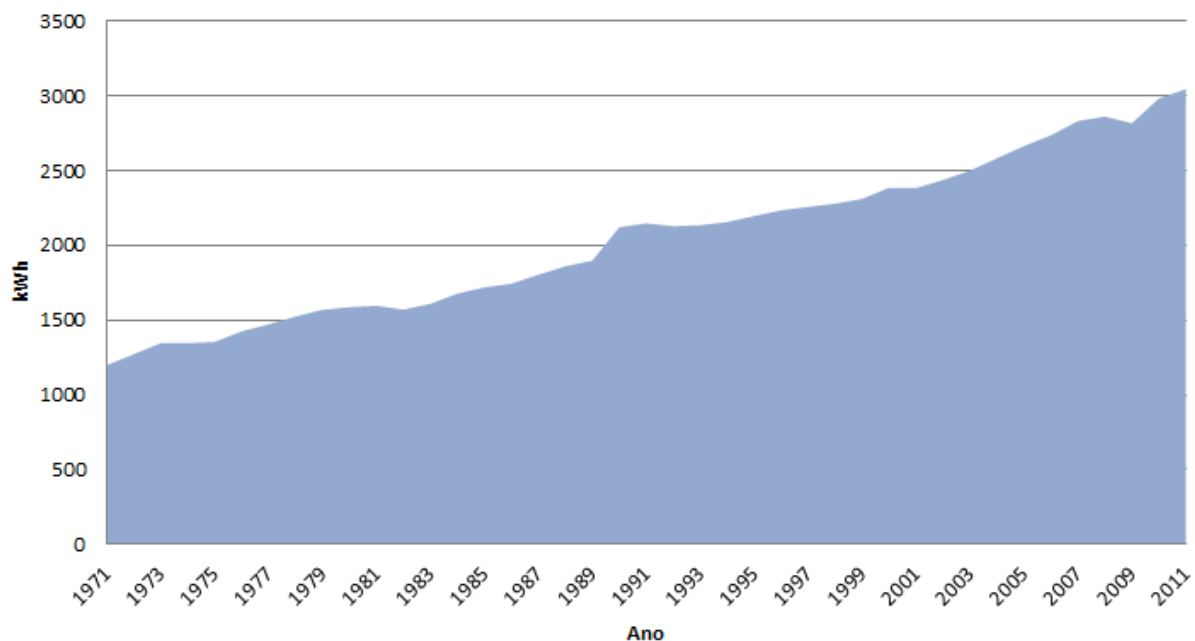


Figura 2.3: Consumo mundial de energia elétrica, por pessoa [13]

⁶Área da eletrónica que estuda o processamento da energia elétrica, no sentido de obter maior eficiência e qualidade, sobretudo nos processos de conversão de energia (formas de onda de tensão e corrente).

A energia nuclear e os combustíveis fósseis são, ainda, os principais responsáveis pela produção de energia elétrica (em média, 87% em todo o mundo [2], cerca de 70% em Cabo Verde [14], mas apenas 37% em Portugal [15]). Para além destes serem fontes de energia não-renovável, são também muito poluentes, o que causa grandes danos ambientais, como referido anteriormente. Por isto, é evidente a necessidade do aumento de investimento em energias renováveis e não-poluentes para a produção de energia elétrica.

Atualmente, a eletricidade é um bem essencial [16], não só para o funcionamento industrial a nível mundial, como para a qualidade de vida dos cidadãos. Deve, pois, maximizar-se a produção da mesma com o menor custo possível, garantindo, em qualquer situação, não só a sua qualidade como também a sua segurança.

2.2 Sistemas de Energia Elétrica

A produção de energia elétrica é assegurada, principalmente, por centrais elétricas, as quais se encontram, maioritariamente, localizadas em zonas industriais. Estas centrais estão, normalmente, afastadas dos grandes centros de consumo devido a razões técnicas e económicas, nomeadamente a disponibilidade de recursos energéticos primários e reservas em termos ambientais e de infraestruturas.

A estrutura de um sistema de energia elétrica está representada na figura 2.4.

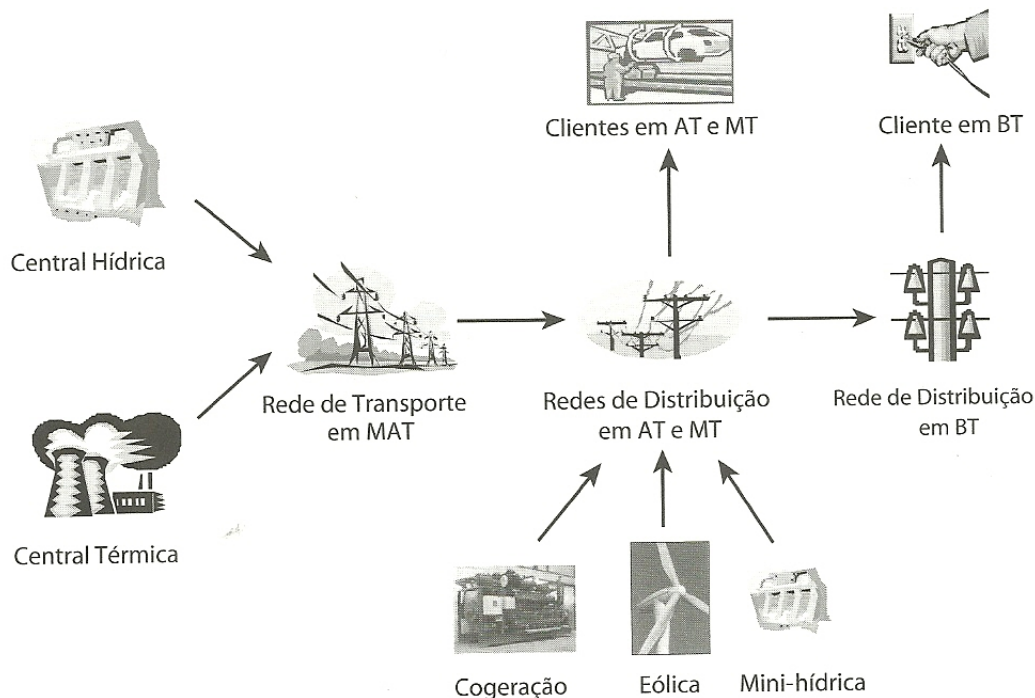


Figura 2.4: Estrutura de um Sistema de Energia Elétrica [8]

As centrais elétricas estão em locais distantes dos locais de consumo e produzem a energia que é entregue à rede de transporte de linhas de Muito Alta Tensão (MAT). Após a passagem por transformadores, a energia é transferida para a rede de distribuição em Alta Tensão (AT) ou Média Tensão (MT), que a conduz até aos consumidores de AT ou MT, respetivamente. Paralelamente, a energia passa para a rede de distribuição de Baixa Tensão (BT), a qual é conduzida até aos consumidores comuns, através dos Postos de Transformação (PTs). As instalações de produção de baixa potência descentralizadas ou locais (geralmente, centrais de produção renovável ou cogeração) entregam a energia produzida às redes de distribuição anteriormente referidas.

2.2.1 Sistema Elétrico de Portugal

Alguns anos após o aparecimento da primeira central elétrica em Pearl Street, Nova Iorque (1882), surgiu a Central Tejo⁷ (representada na figura 2.5) em Portugal (1909), uma central termoeletrica que abasteceu de eletricidade toda a cidade e região de Lisboa. [17]

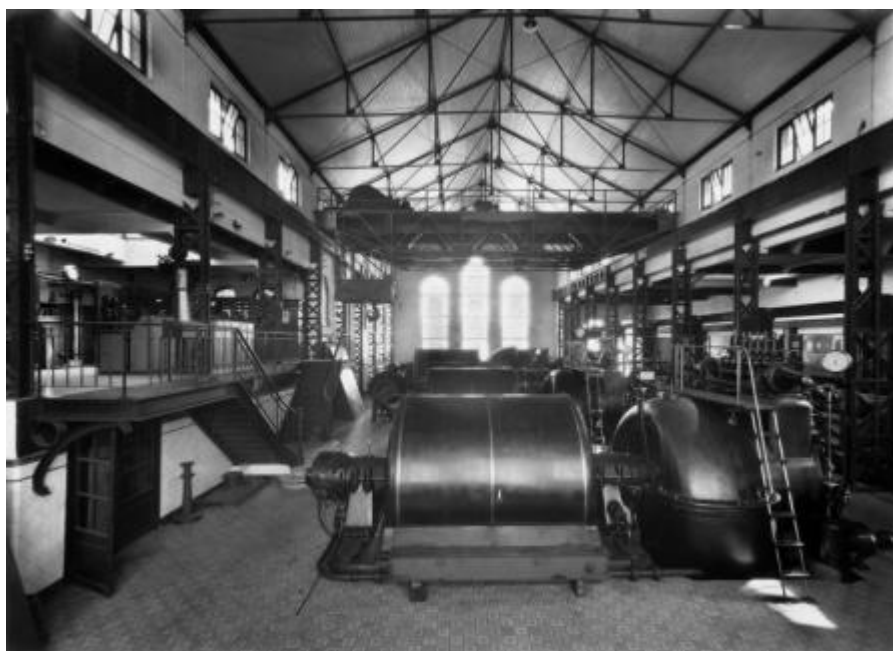


Figura 2.5: Central Tejo de Baixa Pressão [18]

O grande impulsionador da construção da rede elétrica, em Portugal, na década de 50, foi José Ferreira Dias, professor catedrático do Instituto Superior Técnico (IST) e fundador da Companhia Nacional de Eletricidade (CNE). Em 1969 foi criada a Companhia Portuguesa de Eletricidade, que era responsável tanto pela produção como pelo transporte de energia. Só em 1976 ocorreu a total nacionalização do sector elétrico português, onde

⁷Situada em Belém, Lisboa, esta central está aberta ao público, desde 1990, como Museu da Eletricidade.

foi constituída a Energias de Portugal (EDP), que veio a ser parcialmente privatizada nos dois anos seguintes. [8]

Entre 1990 e 2008, a taxa de crescimento anual média da produção global de energia fixou-se em 3%, valor abaixo dos 3,5% registados em Portugal (apenas 1,5% na União Europeia). A produção de energia em Portugal tem como principais fontes primárias de energia as convencionais gás natural, carvão e petróleo e as renováveis hídrica, eólica, fotovoltaica e biomassa, sendo que o gás natural, a hídrica e a eólica são responsáveis pela maioria da quantidade de energia gerada. Neste âmbito, prevê-se que, com as atuais políticas de produção de energia em vigor, em 2030 o consumo de combustíveis fósseis reduza significativamente e haja um aumento da produção por fontes renováveis. [8]

2.2.2 Sistema Elétrico de Cabo Verde

O arquipélago de Cabo Verde situa-se no Oceano Atlântico e está distribuído por dez ilhas, das quais nove estão habitadas. Este arquipélago é influenciado, durante quase todo o ano, pelo anticiclone dos Açores, o que resulta num fluxo quase ininterrupto de ventos alísios⁸. O clima do país é, tipicamente, seco, embora seja caracterizado pela existência de duas estações. Os meses contemplados entre Novembro e Junho, inclusive, são dominados por um clima severamente seco, enquanto os meses compreendidos entre Julho e Outubro, inclusive, são distinguidos pelas fortes chuvas. A nível económico, Cabo Verde enquadra-se nos países de médio desenvolvimento. O sector dos serviços é o sector dominante da economia do arquipélago, sendo a principal fonte de rendimento nacional (nos últimos anos, representou mais de 60% do Produto Interno Bruto (PIB)). [14]

Atualmente, o sistema elétrico de Cabo Verde apresenta uma taxa de cobertura territorial da rede elétrica de, cerca de, 95%. A maioria da energia elétrica produzida em Cabo Verde é gerada em centrais termoelétricas, onde os combustíveis fósseis predominam como fontes primárias, como é possível observar na figura 2.6. Este facto prejudica a economia energética do arquipélago, uma vez que ficam significativamente dependentes da volatilidade dos mercados petrolíferos e das oscilações dos preços dos combustíveis. Esta é uma das principais causas da vulnerabilidade económica do país, para além de constituir uma fatura pesada no balanço externo do mesmo. [19]

Das dez ilhas que constituem o arquipélago, é possível distinguir as ilhas de Santiago, S. Vicente e Sal pela sua componente de energias renováveis, quer seja energia solar ou eólica, que chega atingir o valor de 11% nas fontes primárias de geração de energia elétrica. Por esta razão, verifica-se que o custo de produção de eletricidade (incluem custos de combustível, operação e manutenção) nestas ilhas é inferior ao custo de produção nas restantes.

O sistema elétrico de Cabo Verde caracteriza-se pela falta de meios de monitorização de Qualidade de Energia (QoE) e de QoS no abastecimento de energia elétrica às populações.

⁸Ventos que ocorrem durante todo o ano nas regiões tropicais e têm a sua origem a norte ou nordeste. São ventos regulares húmidos e frescos caso o percurso marítimo seja considerável ou são secos e quentes quando provêm do continente africano.

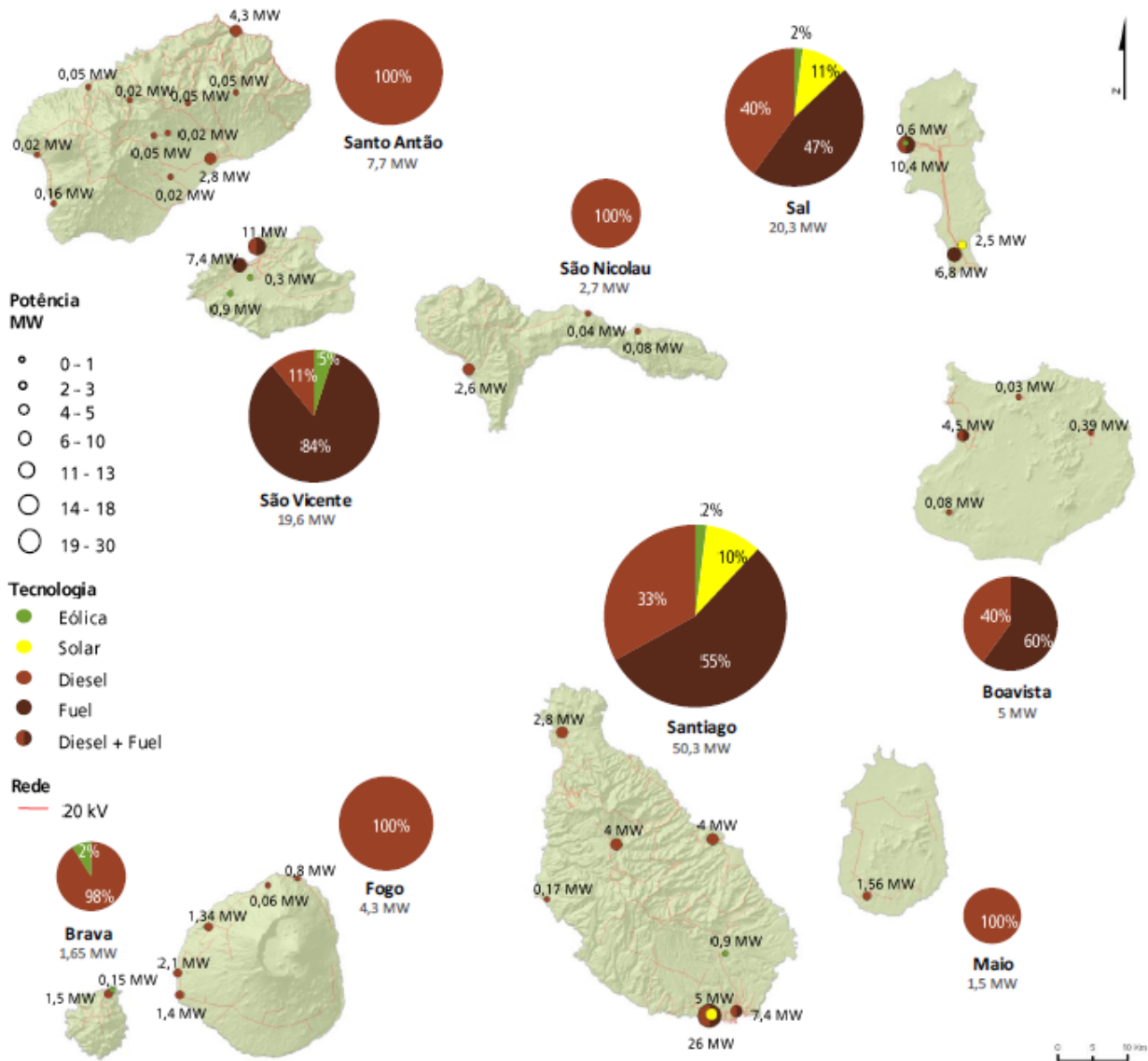


Figura 2.6: Centrais produtoras de energia elétrica de Cabo Verde [19]

O elevado nível de perdas comerciais conduz também a uma forte diminuição das receitas devido à impossibilidade de gestão eficiente da rede elétrica e respetiva manutenção, o que se reflete de forma negativa na qualidade do serviço prestado aos clientes cumpridores. As limitações das infraestruturas existentes e o défice da capacidade de geração provocam ainda múltiplas falhas no sistema elétrico que resultam em apagões (*blackouts*) inoportunos e não programados, o que prejudica não só a sustentabilidade económica do arquipélago, mas também o conforto e bem-estar dos consumidores. Por outro lado, o aumento verificado e as previsões futuras de penetração de energias renováveis no arquipélago gera uma série

de desafios no que concerne à gestão, operação, segurança e estabilidade da rede elétrica.

A Empresa de Eletricidade e Água, SARL (ELECTRA)⁹ é a empresa atualmente responsável pela produção e distribuição de eletricidade e de água em Cabo Verde. Em conjunto com a Gesto Energy Consulting (GESTO)¹⁰, estão a desenvolver projetos que visam a modernização do parque eletroprodutor. Estes terão o intuito de solucionar alguns problemas atuais, nomeadamente a reduzida garantia no fornecimento de energia (causada, essencialmente, por avarias nos grupos geradores e pela ocorrência de defeitos nas redes de transporte e distribuição). Além disso, pretende atingir-se uma taxa de penetração de 50%, até 2020, em fontes renováveis de energia [14] e reduzir o elevado valor de perdas comerciais em todo o país, que chega a atingir os 35% nas zonas rurais [20]. [19]

2.3 Sistemas de despacho energético

A maioria da produção de eletricidade ocorre em grandes centrais elétricas e tem os combustíveis fósseis, a energia nuclear, a água e o vento como principais fontes de energia [21]. Posteriormente, esta energia é despachada até ao consumidor final, de acordo com a previsão de consumo que irá fazer, tendo como limite a potência contratada. Os sistemas que são responsáveis por gerir e controlar a produção de energia em função do consumo horário denominam-se por sistemas de despacho energético [22].

Os sistemas de despacho energético são, então, sistemas que permitem efetuar a gestão, controlo e monitorização da rede elétrica, nomeadamente da produção de energia, numa tentativa de suprir as necessidades dos consumidores, em tempo real, podendo mesmo atuar nos geradores e turbinas, detetar avarias [23] ou até efetuar o deslastre¹¹ de cargas, garantindo uma maior fiabilidade e segurança do serviço. Este tipo de sistemas pode fornecer toda a informação necessária para que um técnico proceda às operações na rede ou pode, eventualmente, operar na rede de forma autónoma.

2.3.1 Sistema continental (Portugal)

Em Portugal, a Rede Elétrica Nacional (REN)¹² (figura 2.7a) é a atual responsável pelo transporte de energia e a Energias de Portugal (EDP)¹³ (figura 2.7b) é a atual responsável pela distribuição da mesma. Estas duas empresas são, então, as *Utilities* responsáveis por efetuar todos os procedimentos inerentes à rede elétrica portuguesa. O despacho energético é um desses processos e tem procedimentos diferentes, quando se trata de transporte ou distribuição.

⁹<http://www.electra.cv/>

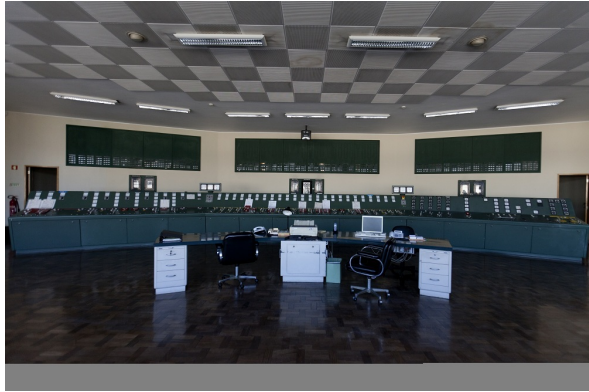
¹⁰<http://www.gestoenergy.com/>

¹¹O deslastre consiste na interrupção do fornecimento de energia, num determinado local ou a nível nacional, por razões de segurança, estabilidade do sistema elétrico, para reparação ou manutenção da rede elétrica, benefício público ou outros motivos previstos no Regulamento de Relações Comerciais do Sector Elétrico [24].

¹²<http://www.ren.pt/>

¹³<http://www.edpdistribuicao.pt/>

Assim, pela definição de despacho energético e pelo referido anteriormente, é possível inferir que, em Portugal, não há um sistema de despacho unificado implementado. Na figura 2.7 estão representados os centros de despacho de cada uma das concessionárias de energia, associadas ao transporte e distribuição, respetivamente.



(a) Centro de Despacho da REN [25]



(b) Centro de Despacho da EDP [26]

Figura 2.7: Centros de Despacho em Portugal

2.3.2 Sistema isolado (Cabo Verde)

As dez ilhas que constituem Cabo Verde são sistemas energeticamente isolados e algumas delas são, também, um Sistema Elétrico Híbrido (SEH)¹⁴. Neste caso, a maioria da energia elétrica (mais de 95% [19]) é gerada em centrais elétricas (exemplo na figura 2.8) que utilizam os combustíveis fósseis como principal fonte de energia para a sua produção, o que dificulta bastante a competitividade no mercado interno [5] devido ao elevado custo de importação desses combustíveis [4].

Para além do referido anteriormente, um dos principais problemas prende-se com as perdas comerciais¹⁵, que podem atingir os 35% nas redes rurais, o que constitui uma quota-parte significativa no custo de produção de eletricidade e influencia, em grande escala, as tarifas atualmente em vigor. [20].

Por último, mas não menos importante, há uma grande instabilidade na rede elétrica, nomeadamente desvios de frequência e tensão nos nós da rede, causada por alterações climáticas bruscas. Por outro lado, há ainda instabilidades técnicas, no que concerne à garantia de fornecimento de energia, devido a falhas/avarias nos grupos geradores ou defeitos nas redes de transporte e/ou de distribuição. [19]

Atualmente, o despacho de energia é efetuado manualmente, com recurso a uma tabela que contém os registos dos consumos horários de cada dia, mês e ano, dos últimos anos.

¹⁴Sistema onde coexistem tecnologias de conversão de energia convencional (por exemplo, a fuelóleo) e tecnologias de conversão e/ou armazenamento de energias renováveis. [22]

¹⁵As perdas comerciais, ou não técnicas, estão relacionadas com qualquer ação fraudulenta na rede elétrica, como por exemplo uma ligação clandestina ou desvios de energia ou fraudes internas [20].



Figura 2.8: Central Única de Distribuição de Energia de Palmarejo (cidade da Praia, ilha de Santiago, Cabo Verde) [27]

A potência que cada gerador deve fornecer, num dado momento, é, então, determinada com o auxílio desses registos, supondo que os valores de consumo serão aproximados aos ocorridos anteriormente, nas mesmas circunstâncias.

2.4 Redes elétricas inteligentes (*Smart Grids*)

A sociedade atual enfrenta imensos problemas relacionados com energia e a rede elétrica. Entre eles constam a dificuldade da atual organização da rede elétrica em responder e acompanhar o aumento e variações na procura diária de energia, devido aos crescentes consumos domésticos e industriais e às necessidades energéticas das fábricas e empresas.

As imensas possibilidades atuais de microgeração de energia, como por exemplo os painéis fotovoltaicos instalados em residências particulares e o futuro aumento da circulação de carros elétricos, também eles particulares, constituem uma dificuldade na gestão e operação da rede, devido ao valor inconstante de produção de eletricidade e às consequentes instabilidades que isso pode causar na rede. [28]

O elevado consumo de combustíveis fósseis utilizado para gerar energia e a necessidade de investimento em recursos renováveis e não poluentes como fontes primárias de produção de energia são alguns dos principais problemas do atual modelo da rede elétrica, pelas políticas ambientais que são impostas e pela competitividade do mercado. Para além disto, a elevada penetração de fontes de energia renovável trazem problemas técnicos adicionais, no que diz respeito a flutuações na frequência de oscilação da rede, picos de sobrecarga e reduções de tensão.

O elevado número de perdas comerciais, ou não-técnicas, maioritariamente verificados em países sub-desenvolvidos, leva a que se tomem medidas de prevenção e combate à fraude, quer seja pela interruptibilidade ou pela cobrança antecipada de energia.

Todos estes fatores prejudicam o desempenho das redes elétricas de energia, o que cria dificuldades adicionais não só às *Utilities* responsáveis pela produção, transporte e/ou distribuição de energia, mas também aos consumidores da mesma, pelos impactos refletidos que isso pode trazer, nomeadamente, o aumento das tarifas aplicadas. Para auxiliar na solução destes problemas, é introduzido o conceito de redes elétricas inteligentes (exemplo na figura 2.9).



Figura 2.9: Rede Inteligente (*Smart Grid*) [29]

As redes elétricas inteligentes, também conhecidas como *Smart Grids*, são redes que alteram a maneira como a energia é distribuída e utilizada. Estas gerem, ainda, a produção de energia atual e futura de acordo com o consumo instantâneo e anteriores previsões do mesmo, de modo a minimizar as falhas e interrupções na rede elétrica, aumentar a sua eficiência, diminuir os custos de produção de energia e trazer vantagens, quer económicas, quer de qualidade e segurança, aos seus consumidores [30]. Portanto, as *Smart Grids* conseguem retirar informação, em tempo real, do atual estado da rede elétrica, processá-la, recorrer às ferramentas apropriadas para analisar toda essa informação e tomar decisões adequadas que influenciem o modo de operação da rede, no sentido de a manter a níveis elevados de qualidade e segurança.

Para além disto, as redes inteligentes, com recurso a tecnologias avançadas de análise de informação e de processamento de eventos gerados na própria rede, permitem a antevisão de problemas e falhas que possam vir a ocorrer no futuro. Esta proatividade e capacidade de antevisão resolvem, assim, a dificuldade que a *Utility* tem em identificar os problemas e as respetivas localizações, sem que o consumidor tenha de lhe fornecer essa informação.

2.5 Resumo

Os primeiros conhecimentos sobre a energia elétrica surgiram em meados do séc. XVIII, o que deu origem às primeiras centrais elétricas, no final do séc. XIX (1882).

A Revolução Industrial foi impulsionada pelo aparecimento do motor e das máquinas a vapor que, conseqüentemente, foram utilizadas como acionadoras das primeiras centrais elétricas.

A Segunda Guerra Mundial provocou uma reestruturação nos sistemas de energia elétrica da maioria dos países europeus (incluindo Portugal), o que, aliado à inovação tecnológica e organizacional, permitiram uma rápida evolução do modelo da rede elétrica para um modelo onde a produção é centralizada, afastada dos grandes centros de consumo, e a energia é, posteriormente, transportada em linhas de Muito Alta Tensão (MAT) e distribuída em linhas de Alta Tensão (AT) e Média Tensão (MT), até chegar aos consumidores, por meio de PTs.

Toda a evolução tecnológica e populacional ocorrida nos últimos 60 anos levou a um aumento exponencial da procura de energia. As *Utilities* tiveram, então, de se adaptar a estas alterações e encontrar mecanismos de produção mais eficientes, com menores custos e menores impactos ambientais, para suprir as necessidades de energia exigidas pela sociedade, não só a nível da procura, como da qualidade e da segurança, e para cumprir as restrições impostas ao sector elétrico.

Ao longo dos anos, tem vindo a observar-se um aumento da penetração das fontes de energia renovável como fontes de energia primária para a geração de energia elétrica, o que, juntamente com os problemas já existentes, aumentou a complexidade no que diz respeito à gestão, operação e controlo da rede de energia elétrica.

Os sistemas de despacho de energia podem, então, servir como uma possível solução para alguns dos problemas referidos, auxiliando na produção de energia necessária à procura, num determinado momento.

Após uma análise cuidada à situação atual do sector das *Energy & Utilities* (E&U), é possível inferir que a integração de redes inteligentes, das quais os sistemas de despacho energético fazem parte, neste tipo de sistemas, é totalmente benéfica. De entre essas vantagens destacam-se:

- Otimização da exploração de parques eletroprodutores;
- Otimização da capacidade de resposta da rede elétrica devido ao aumento da demanda energética;
- Redução da dependência da volatilidade dos mercados petrolíferos e, conseqüentemente, dos combustíveis fósseis, considerando que são as principais fontes de energia mundiais;
- Diminuição dos custos de operação;
- Maximização da penetração de energias renováveis em segurança, assegurando a qualidade da energia elétrica;

- Redução dos impactos que as alterações climáticas bruscas causam na produção de energia, nomeadamente na estabilidade dos sistemas (desvios de frequência e tensão nos nós da rede);
- Eliminação da instabilidade da rede por falhas e avarias nos grupos geradores ou defeitos nas redes de transporte e/ou de distribuição;
- Maximização da segurança do sistema e garantia de elevados padrões de continuidade de serviço;
- Detecção e redução do nível de perdas comerciais.

Capítulo 3

Arquitetura do Sistema

Este capítulo pretende explicar a arquitetura do Sistema de Despacho (SD) que será desenvolvido e implementado, bem como mostrar a visão geral do mesmo. Descrevem-se todos os blocos constituintes, separados por dados de entrada e dados de saída, e explicam-se as interações entre os mesmos, de modo a demonstrar o funcionamento global do sistema.

3.1 Sistema de Despacho (SD)

Para assegurar as condições de segurança de operação da rede elétrica necessárias à integração de fontes de energia renovável em sistemas isolados, o Sistema de Despacho (SD) funcionará como uma ferramenta avançada de suporte aos operadores de despacho. Com a implementação deste pretende, ainda, otimizar-se a exploração dos parques eletroprodutores, maximizar-se a penetração de energias renováveis em segurança, assegurando a qualidade da energia elétrica, e maximizar-se a segurança do sistema, garantindo elevados padrões de continuidade do serviço.

Este sistema terá de avaliar, monitorizar e prever a produção das Centrais de Produção de Energia (CPE) Convencional e Renovável, bem como efetuar a previsão do consumo, garantindo que serão sempre os grupos térmicos mais eficientes e com melhores rácios económicos a entrar em produção.

O SD terá por base algoritmos que deverão ser suportados por **critérios técnicos** (segurança e estabilidade da rede e reserva girante), **económicos** (rácio económico dos diferentes grupos) e **operacionais** (disponibilidade dos grupos geradores e limites de exploração). Este sistema deverá formular uma sugestão que inclua, então, a combinação dos grupos térmicos que devem ser despachados, bem como o seu valor de potência a fornecer.

3.1.1 Visão geral

Na figura 3.1, apresenta-se o esquemático da visão geral do Sistema de Despacho (SD). De seguida, é feita uma pequena descrição de cada componente, bem como do seu papel no sistema.

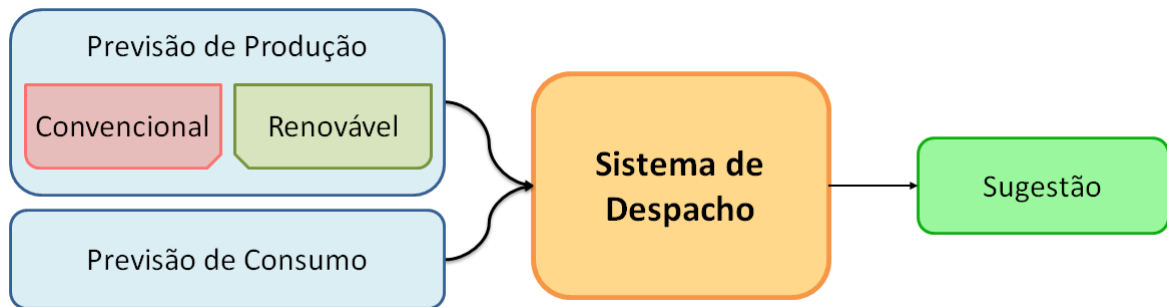


Figura 3.1: Visão geral do Sistema de Despacho (SD)

3.1.2 Dados de entrada

O Sistema de Despacho (SD) utiliza dados de previsões, quer de produção quer de consumo, como dados de entrada, para conseguir formular as sugestões pretendidas. Ao nível da produção, é possível distinguir dois tipos de previsões: produção convencional e produção renovável. As previsões de consumo englobam toda a procura de energia, desde o consumo doméstico à iluminação pública.

Previsão de Produção Convencional (PPC)

A produção convencional corresponde à energia gerada em centrais termoelétricas (ver o exemplo da figura 3.2), isto é, centrais que convertem em energia eléctrica a energia térmica obtida pela queima de combustíveis fósseis, sejam eles o petróleo, o carvão ou o gás natural.



Figura 3.2: Central termoelétrica instalada na cidade da Praia, ilha de Santiago [31]

Os valores de Previsão de Produção Convencional (PPC) são obtidos com base nas especificações técnicas e na disponibilidade dos grupos térmicos existentes no sistema. Para além disto, são tidos em consideração os valores registados em anos anteriores, nas mesmas condições.

Previsão de Produção Renovável (PPR)

A produção renovável equivale a toda a energia gerada em centrais/parques que geram energia elétrica a partir de fontes de energia renovável, como sejam a energia eólica (parques eólicos, como no exemplo da figura 3.3a), a energia solar (parques fotovoltaicos, como no exemplo da figura 3.3b) e a energia hídrica (centrais hidroelétricas).



(a) Parque Eólico da Ilha de Santiago [32]



(b) Parque Fotovoltaico da Ilha do Sal [33]

Figura 3.3: Parques de Energias Renováveis

Os valores de Previsão de Produção Renovável (PPR) estão fortemente dependentes do tipo de energia renovável que é utilizada na geração de energia elétrica. No caso de um parque eólico, a energia cinética proveniente do vento, e consequente quantidade de eletricidade gerada, é tanto maior quanto maior for a intensidade do vento. Já no caso de um parque fotovoltaico, a produção de energia durante a noite é nula, devido à ausência de luz solar. Assim, a intermitência das fontes de energia renovável faz com que o valor de PPR esteja em constante alteração e dependa das previsões meteorológicas que se vão obtendo, para além das especificações técnicas dos geradores.

Previsão do Consumo (PC)

Para se obterem os valores de Previsão do Consumo (PC), recorre-se a uma análise ao consumo instantâneo, bem como aos diagramas de carga registados em anos anteriores. Estes valores devem ter em conta tanto o impacto da sazonalidade quanto a tipificação semanal, pelo que, por um lado, um diagrama de carga adquirido num típico dia de Verão será incorretamente utilizado para obtenção dos valores de PC de um dia de Inverno e,

por outro lado, um diagrama de carga típico de um fim-de-semana não deverá servir como base para o cálculo dos valores de PC de um dia de semana.

3.1.3 Dados de saída

A saída do Sistema de Despacho (SD) será a formulação de uma sugestão que contém, obrigatoriamente, informação que permita identificar os grupos térmicos que deverão estar em funcionamento, num determinado intervalo de tempo, assim como os respectivos valores de potência que deverão gerar. Para além dessa informação, o sistema poderá fornecer dados opcionais, de acordo com o que se achar relevante num dado momento.

3.2 Resumo

O Sistema de Despacho (SD) que será desenvolvido e implementado nesta dissertação é composto, essencialmente, por três componentes:

Previsão de Produção Calcula os valores de previsão de produção, quer convencional quer renovável, com base nas especificações técnicas dos grupos de produção e dos respectivos geradores e as previsões meteorológicas.

Previsão de Consumo Determina a previsão dos valores de consumo, tendo em conta o consumo instantâneo, o impacto da sazonalidade e a tipificação semanal.

Sugestão Contém uma sugestão dos grupos de geradores que deverão estar em funcionamento, assim como a potência que devem estar a fornecer.

A interligação destes componentes, de acordo com a figura 3.1, permite a construção do SD e a obtenção do resultado pretendido.

Capítulo 4

Processo de Despacho

O corrente capítulo contém uma explicação detalhada dos algoritmos utilizados no processo de despacho, a sua aplicação no contexto do projeto e uma análise comparativa entre estes e outros algoritmos estudados. É apresentado o desenvolvimento dos processos inerentes aos algoritmos escolhidos, nomeadamente, o pré-despacho, o despacho económico e o desligamento/redução de potência de geradores, e ainda as suas implementações.

4.1 Despacho Energético

O processo de despacho energético consiste na gestão e controlo da produção de energia em função do consumo horário, isto é, no balanceamento entre a oferta e a procura de energia.

A produção renovável está diretamente dependente das condições meteorológicas, tais como as intensidades do vento e da radiação solar, e as suas constantes variações provocam uma oscilação imediata na energia renovável produzida. Este facto causa uma significativa instabilidade na rede elétrica, quer ao nível da frequência quer da tensão, o que pode colocar em causa tanto a segurança da rede como a qualidade da energia elétrica distribuída.

Atualmente, o despacho de energia é efetuado manualmente, recorrendo a tabelas que contêm os registos do consumo ocorrido em anos anteriores. As decisões de ligar/desligar geradores, para um determinado dia, são tomadas por operadores que comparam os valores do consumo registados nesse mesmo dia noutros anos e, de acordo com uma média efetuada e, também, com a sua experiência, decidem ligar ou desligar os geradores que permitem fazer um balanceamento da carga. As decisões tomadas nem sempre são as mais indicadas pois não há o cuidado de verificar, regularmente, se os geradores estão a fornecer a potência necessária, se é possível reduzir a potência fornecida pelos mesmos e se há possibilidade de desligar algum gerador ou ligar um mais economicamente viável.

Para auxiliar na solução deste problema, propõe-se o desenvolvimento de um Sistema de Despacho (SD) que efetue o balanceamento da carga, em tempo real, e que cumpra as restrições do sistema e dos geradores, com o menor custo de produção possível. Portanto, o

SD deve fazer a gestão e o controlo da produção de energia elétrica, no sentido de estabilizar a rede e solucionar os problemas provenientes da integração de fontes de energia renovável no sistema. Este sistema deve ser, então, capaz de aumentar e reduzir a quantidade de energia gerada pelos geradores termoelétricos, sempre que necessário.

O Sistema de Despacho (SD) deve proporcionar o aumento da produção de energia convencional quando a procura de energia excede a quantidade disponível no sistema. Assim, deve, sempre que possível, aumentar-se a potência fornecida pelos geradores em funcionamento até ao seu limite máximo ideal. Depois disto, deve, então, ligar-se geradores termoelétricos para suprir a energia elétrica em falta, tendo em conta que os geradores com menor rácio económico têm maior prioridade sobre os geradores na situação oposta. Os processos associados a estes procedimentos denominam-se pré-despacho e despacho económico.

Quando a energia disponível no sistema é superior à efetivamente necessária, deve proceder-se, sempre que possível, ao desligamento dos grupos termoelétricos em funcionamento. No caso disto não ser possível, deve reduzir-se a potência gerada pelos mesmos, até ao seu valor mínimo, de modo a evitar o desperdício de energia e reduzir os custos de produção da mesma. Este processo intitula-se de desligamento/redução de potência.

O despacho pode, então, ser visto como um macroprocesso construído a partir de um conjunto de microprocessos, sendo os principais o pré-despacho, o despacho económico e a redução de potência.

O processo de **pré-despacho** é responsável por comissionar geradores, o que significa que deve restringir a lista dos geradores disponíveis no sistema e selecionar apenas os que estiverem em condições para entrar em funcionamento ou para aumentar a potência gerada, num dado período de tempo.

O **despacho económico** tem como objetivo atribuir a potência a cada um dos geradores selecionados anteriormente, no pré-despacho. Desta forma, consegue ter-se os geradores a produzir apenas a potência necessária para suprir a carga, num determinado intervalo de tempo, com o menor custo possível, assegurando as restrições do sistema e dos geradores.

Por analogia ao aumento de potência ou comissionamento de geradores (pré-despacho seguido do despacho económico), é possível, ainda, efetuar o desligamento ou a redução de potência de um gerador em funcionamento ou, se possível, desligá-lo, no caso da produção de potência ser superior à carga no momento de execução do processo. O processo de **desligamento/redução de potência** é, então, responsável por efetuar os devidos procedimentos para que não haja excesso de produção. Este processo contempla, igualmente, as restrições técnicas dos geradores e do sistema.

O processo de despacho é descrito de seguida, na secção 4.1.1. Posteriormente, descrevem-se detalhadamente os microprocessos constituintes, respetivamente, nas secções 4.2, 4.3 e 4.4.

4.1.1 Descrição e diagrama de fluxo

O processo de despacho energético é descrito na figura 4.1 através do seu diagrama de fluxo. Com este pretende dar-se uma visão do macroprocesso e dos microprocessos constituintes.



Figura 4.1: Diagrama de Fluxo do Processo de Despacho

Aquisição de previsões

Para executar o processo de despacho, é necessário, à partida, conhecer os valores das previsões, quer de produção convencional e renovável, quer de consumo de energia. Estes valores podem ser calculados a partir das equações apropriadas ou podem ser adquiridos através de solicitações aos sistemas/módulos externos correspondentes.

Produção convencional necessária

A partir dos valores das previsões é possível calcular o valor da produção necessária para colmatar a procura de energia. Uma vez que o valor da produção renovável é influenciado, entre outras coisas, pela variação das condições climatéricas, o valor da produção que se pretende controlar está apenas associado à produção convencional, pelo que apenas os geradores térmicos das CPE Convencional vão ser despachados.

Produção excedente *vs* insuficiente

Após ser calculado o valor da produção convencional necessária, verifica-se se esse valor será suficiente para satisfazer as necessidades da procura de energia. No caso de ser suficiente, avalia-se se o valor da previsão de produção excede o valor da procura para, nesse caso, se proceder à redução de potência ou, idealmente, ao desligamento de geradores.

Quando se confirma que o valor da produção convencional necessária não é suficiente para suprir a procura de energia, é imprescindível recorrer ao pré-despacho, seguido do despacho económico, a fim de aumentar a potência de um ou mais geradores que estejam em funcionamento ou ligar geradores que estejam desligados, no momento da execução do processo.

4.2 Pré-despacho

O pré-despacho é executado quando a produção de energia não é suficiente para suprir o consumo. Este processo consiste no comissionamento dos geradores disponíveis no sistema, isto é, executa um algoritmo que efetua uma seleção dos geradores que devem entrar em funcionamento de modo a colmatar a procura de energia, minimizar os custos de produção da mesma e salvaguardar, em qualquer situação, as restrições técnicas do sistema e dos geradores. Para além do comissionamento de geradores, este microprocesso verifica, ainda, se é possível e economicamente viável aumentar a potência dos geradores em funcionamento no momento da execução do processo.

4.2.1 Descrição e diagrama de fluxo

Para o pré-despacho foi, então, escolhido um algoritmo que seleciona os geradores em função do seu rácio económico e dos seus limites de operação, cujo diagrama de fluxo está descrito na figura 4.2.

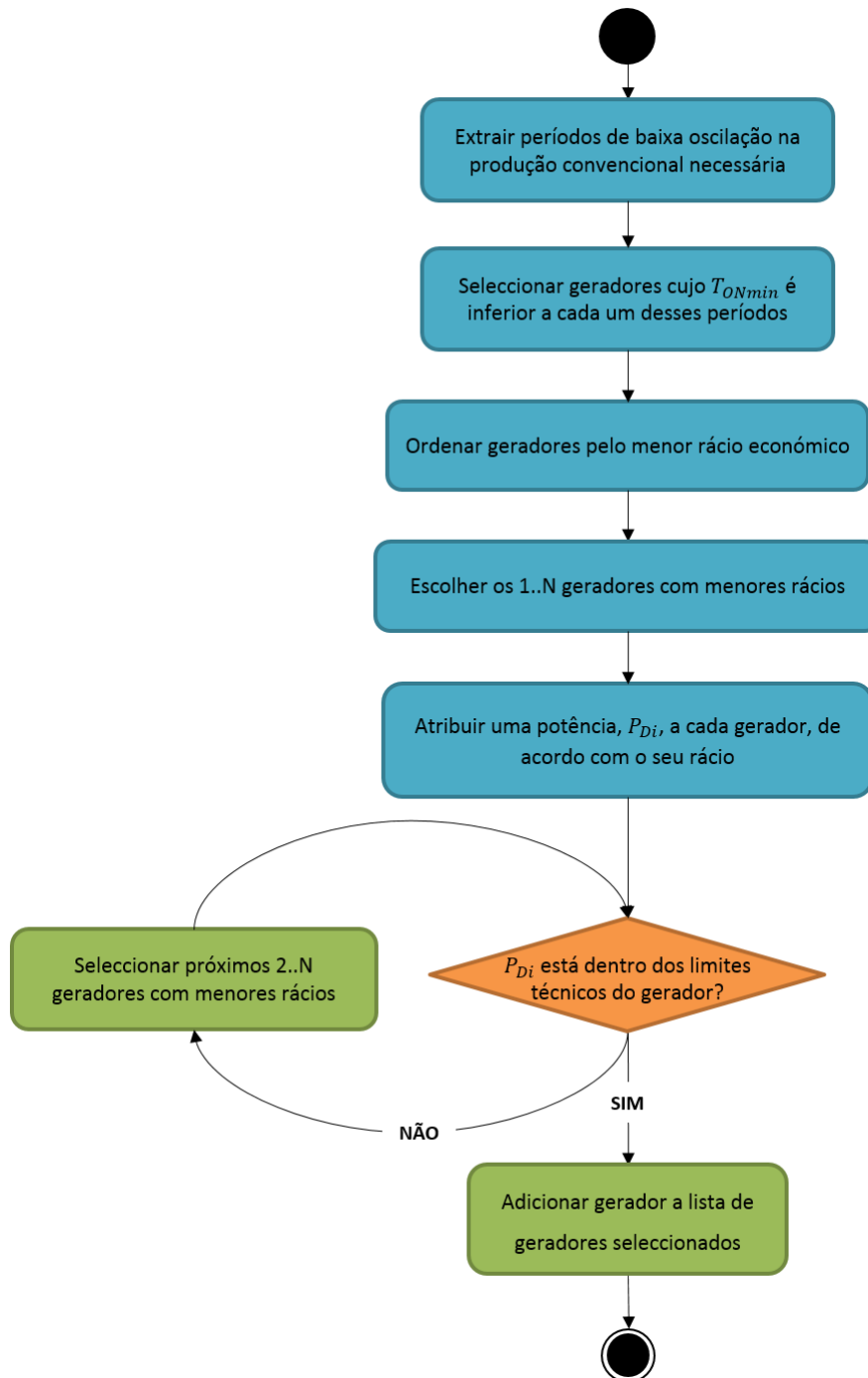


Figura 4.2: Diagrama de Fluxo do Processo de Pré-despacho

Períodos de tempo da curva de produção convencional necessária

Para dar início ao processo de pré-despacho, é necessário conhecer a curva de produção convencional necessária. Para tal, extraem-se os períodos de baixa oscilação da mesma,

isto é, intervalos de tempo cujo valor correspondente não ultrapasse o *threshold* definido.

Começa-se, então, por analisar a curva de produção convencional necessária, desde o início. Por comparação de valor a valor, vão-se registrando o máximo e o mínimo e verificando se a diferença entre eles é superior ao *threshold* referido. No caso de ser inferior, continua-se a comparação entre valores. Quando essa diferença for superior, obtém-se o intervalo de tempo dos instantes imediatamente anteriores a esse momento e atribui-se, para esse período, o máximo dos valores comparados. Efetua-se o mesmo procedimento até atingir o fim da curva.

Assim, obtém-se um conjunto de períodos de tempo, associados aos valores de carga, P_D pretendidos.

Restrição do conjunto de geradores pelo tempo mínimo de funcionamento

Cada gerador térmico tem associado um tempo mínimo de funcionamento, $T_{ON,min}$, o que significa que, depois de ser ligado, deve estar, pelo menos, esse tempo a gerar energia para que seja eficiente. Por isto, e para cada intervalo de tempo identificado anteriormente, selecionam-se, do conjunto total de geradores no sistema, os que têm um $T_{ON,min}$ inferior à duração do período de tempo. Os geradores cujo $T_{ON,min}$ é superior ao período em causa são economicamente inviáveis, salvo exceções em que o gerador esteja já em funcionamento, pelo que devem ser descartados para esse intervalo de tempo. Assim, cada gerador deve cumprir as restrições impostas pelas equações 4.1 ou 4.2.

$$T_{i,ON} \geq T_{i,ON,min} \quad (4.1)$$

$$T_{i,ON} < T_{i,ON,min} \wedge T_{i,ON,min} - T_{i,ON} \leq dur_t \quad (4.2)$$

onde $T_{i,ON}$ é o tempo de funcionamento do gerador i no momento de execução do processo;

$T_{i,ON,min}$ é o tempo mínimo de funcionamento do gerador i ;

dur_t é a duração do período de tempo, t , em causa.

Ordenação pelo menor rácio económico

Depois da primeira fase de seleção de geradores, por cada período de tempo, procede-se à ordenação dos mesmos de acordo com o seu rácio económico. O valor do custo de produção de energia de um gerador é definido por uma função quadrática da potência gerada, onde a , b e c são os coeficientes da mesma, característicos de cada gerador. Assim, a função de custo de produção, $C_i(P_i)$ do gerador i quando fornece a potência P_i é definida pela equação 4.3.

$$C_i(P_i) = a_i \times P_i^2 + b_i \times P_i + c_i \quad (4.3)$$

onde $C_i(P_i)$ é a função de custo de produção do gerador i quando fornece a potência P_i ;

P_i é a potência fornecida pelo gerador;

a_i , b_i , c_i são os coeficientes da função de custo de produção.

O rácio económico de cada gerador está diretamente relacionado com os coeficientes definidos anteriormente. Para além disso, cada um deles tem um custo de arranque, SC ,

associado, quando deixam de estar desligados e passam a estar em funcionamento. Este custo adicional está relacionado com o tempo de paragem contínua do gerador, T_{off} e é definido pela equação 4.4,

$$SC_i = \begin{cases} HSC_i, & T_{i,stop} \leq T_{i,off} \leq T_{i,cold} + T_{i,stop} \\ CSC_i, & T_{i,off} \geq T_{i,cold} + T_{i,stop} \end{cases} \quad (4.4)$$

onde SC_i é o custo de arranque do gerador i ;

HSC_i é o custo de arranque a quente do gerador i ;

CSC_i é o custo de arranque a frio do gerador i ;

$T_{i,off}$ é o tempo de paragem contínua do gerador i ;

$T_{i,stop}$ é o tempo mínimo de paragem do gerador i ;

$T_{i,cold}$ é o tempo de arranque a frio do gerador i .

Descritos, então, todos os custos associados a um gerador, pode definir-se o rácio económico, r_i , pela equação 4.5.

$$r_i = \frac{a_i^2 \times b_i}{c_i} + \frac{c_i}{\frac{1}{a_i^2} \times \frac{1}{b_i}} + SC_i \quad (4.5)$$

onde r_i é o rácio económico do gerador i ;

a_i, b_i, c_i são os coeficientes da função de custo de produção;

SC_i é o custo de arranque do gerador i .

Uma vez ordenados os geradores, pode escolher-se os mais economicamente viáveis para restringir o conjunto dos geradores existentes.

Seleção dos geradores com menor rácio

Para restringir o conjunto de geradores possíveis a despachar em cada período de tempo, escolhem-se os geradores com menor rácio cujos limites mínimo, P_{min} , e máximo, $P_{max,ideal}$, compreendem o valor da carga a suprir.

No início, percorre-se o conjunto dos geradores selecionados, um a um, verificando, em cada iteração, se o valor da carga correspondente a esse período de tempo está compreendida nos limites de geração da unidade geradora, i em causa (verificar a condição 4.6). Caso cumpra essa condição, o gerador é selecionado e adicionado ao conjunto de geradores selecionados para o intervalo de tempo em causa. Caso contrário, efetua-se o mesmo procedimento para o gerador seguinte.

$$P_{i,min} \leq P_D \leq P_{i,max,ideal} \quad (4.6)$$

onde P_D é a carga correspondente ao período de tempo em causa;

$P_{i,min}$ é a potência mínima do gerador i ;

$P_{i,max,ideal}$ é a potência máxima ideal do gerador i .

Após o mecanismo anterior, efetua-se novamente o mesmo procedimento mas, desta vez, para uma combinação de n geradores, onde $n = 2..N_G$ e N_G é o número de geradores no sistema. Neste caso, em vez de cada gerador ter de verificar a condição 4.6, tem de cumprir a restrição 4.7, onde P_{Di} é a parte da carga, correspondente ao período de tempo em causa, atribuída ao gerador i . Este valor será tanto maior quanto menor for o seu rácio económico, calculado anteriormente. Portanto, atribui-se uma parte da carga a cada gerador, de acordo com a equação 4.8.

$$P_{i,min} \leq P_{Di} \leq P_{i,max,ideal} \quad (4.7)$$

onde P_{Di} é a parte da carga atribuída ao gerador i , dada pela equação 4.8;

$P_{i,min}$ é a potência mínima do gerador i ;

$P_{i,max,ideal}$ é a potência máxima ideal do gerador i .

$$P_{Di} = P_D \times \frac{\frac{1}{r_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i}} \quad (4.8)$$

onde P_{Di} é a parte da carga atribuída ao gerador i ;

P_D é a carga correspondente ao período de tempo em causa;

r_i é o rácio económico;

n é o número de geradores em causa.

Se todos os geradores da combinação cumprirem a condição 4.7, então todos os geradores dessa combinação são selecionados, sendo adicionados ao conjunto de geradores selecionados para o período de tempo pretendido.

No final de todos estes procedimentos, obtém-se um conjunto restringido de geradores, que cumprem as condições exigidas e estão aptos a colmatar a carga correspondente ao período em causa.

4.3 Despacho Económico

Após o pré-despacho, o microprocesso de despacho económico é executado no sentido de redistribuir a carga entre os geradores anteriormente comissionados, de modo a acompanhar a evolução do consumo horário com o mínimo custo de produção, se possível. Este processo tenta modelar a produção de energia elétrica em relação à procura e permite solucionar, em tempo real, o uso racional da energia primária que é convertida em energia elétrica.

Foi efetuada uma pesquisa intensiva de modo a encontrar a melhor solução para o problema do despacho económico. Para tal, estudaram-se quatro dos algoritmos considerados como referências para a solução do problema em causa. [34]

Nas secções 4.3.1 e 4.3.2 são feitas uma análise qualitativa e uma análise quantitativa, respetivamente, aos algoritmos selecionados. Estas comparações permitirão auxiliar na escolha do algoritmo pretendido, tendo em conta as restrições impostas pelo sistema e as características das próprias unidades geradoras.

4.3.1 Análise qualitativa entre algoritmos

Esta secção apresenta uma análise qualitativa entre os algoritmos dos Multiplicadores de *Lagrange*, Programação Inteira Mista, Programação Dinâmica e *Fuzzy Logic*. Esta análise, juntamente com a análise quantitativa da secção 4.3.2, permitirá decidir qual o algoritmo que melhor se adapta ao problema do despacho económico aplicado ao Sistema de Despacho (SD).

A descrição dos algoritmos e das respetivas vantagens e desvantagens são efetuadas em baixo.

Multiplicadores de *Lagrange* Este método consiste numa estratégia para encontrar um mínimo/máximo local de uma função, sujeita a restrições de igualdade. Para tal, é introduzida uma nova variável, chamada de **multiplicador de *Lagrange***, λ , por cada restrição que se pretende adicionar ao problema e construída a função de *Lagrange*. De seguida, são calculadas as derivadas parciais da função, em ordem às variáveis do problema e aos multiplicadores referidos, e igualadas a zero, de modo a ter-se igual número de equações e incógnitas. No final, é resolvido um sistema onde se obtêm os resultados pretendidos. [35]

Programação Inteira Mista Este método centra-se na otimização de uma função contínua, composta por variáveis inteiras e sujeita a restrições contínuas. [34] A técnica de *branch and bound* é uma das técnicas utilizadas para resolver este tipo de problemas, onde as restrições de integralidade¹ são retiradas da função objetivo e resolve-se o problema como um problema de programação linear puro. Caso a solução obtida não cumpra todas as restrições de integralidade, o problema original é dividido em dois novos problemas de programação linear. Este processo é repetido até que seja encontrada uma solução que cumpra todas as restrições ou uma solução ilimitada ou impossível. [36]

Programação Dinâmica Esta técnica de otimização decompõe o problema num conjunto de problemas mais pequenos. Estes subproblemas são resolvidos e é desenvolvida a solução ótima, recursivamente, para o problema original, passo-a-passo. Este algoritmo avalia cada estado possível e, embora os estados inviáveis sejam rejeitados imediatamente, existirão muitos estados viáveis, pelo que o tempo de execução será elevado e poderá levar ao limite a capacidade dos computadores. [37]

Fuzzy Logic A lógica difusa (*fuzzy logic*) utiliza aproximações de conceitos, em vez de conceitos exatos, como forma de se adaptar às ambiguidades reais das linguagem

¹Restrições que impõem que as variáveis assumam valores inteiros.

e lógica humanas. Deste modo, são definidas variáveis de entrada difusas, assim como variáveis de saída do mesmo tipo. É, então, formado um conjunto de regras que relaciona todas as combinações das variáveis de entrada com todas as possíveis saídas. No final, é feita uma defuzificação para transformar os valores difusos em valores reais. [37]

4.3.2 Análise quantitativa entre algoritmos

Após um estudo detalhado dos algoritmos anteriormente referidos, elaborou-se um Decision Analysis and Resolution (Análise de Decisão e Resolução) (DAR), de modo a quantificar as vantagens e desvantagens de cada um deles. Juntamente com a análise qualitativa da secção 4.3.1, esta análise permitirá inferir qual será o algoritmo mais adequado a utilizar no contexto do problema de despacho económico aplicado ao SD.

O peso de cada um dos critérios foi atribuído de acordo com o que cada um influencia na *performance* do algoritmo, como solução para o problema de despacho económico.

Tempo de computação Deve ser reduzido, pelo que foi considerado um fator determinante na escolha do algoritmo e atribuído um peso de 20%.

Escalabilidade Caso o número de geradores no sistema seja muito grande, é necessário que o algoritmo tenha o mesmo desempenho, quer a nível de tempo de computação ou de eficiência no resultado. Por esta razão, foi atribuído um peso de 20%.

Adaptabilidade O algoritmo deve ser capaz de se adaptar a qualquer tipo de problema. No entanto, como se trata de um problema singular, este critério tem um peso de apenas 10%.

Sensibilidade Pretende-se que o algoritmo não seja muito sensível a pequenas variações na produção ou no consumo de energia, para não produzir sugestões de ligar ou desligar geradores desnecessariamente. Por esta razão, atribui-se um peso de 15%.

Flexibilidade de restrições O problema de despacho económico está sujeito a algumas restrições, seja em termos de tempo de funcionamento ou de potência gerada, entre outros. Assim, o algoritmo deve ser flexível no tipo de restrições que suporta, pelo que foi atribuído um peso de 15%.

Solução ótima Para solucionar este problema é conveniente que se atinja uma solução aproximada à ótima, isto é, que a procura de energia seja suprida com o menor custo possível, daí o seu peso ser 20%.

Na tabela 4.1 constam as cotações atribuídas a cada um dos algoritmos, por critério de avaliação, sendo que esses valores refletem o grau de adequação dos algoritmos a cada parâmetro de avaliação.

Critérios de Avaliação	Multiplicadores de <i>Lagrange</i>	Programação Inteira Mista	Programação Dinâmica	<i>Fuzzy Logic</i>
Tempo de Computação ² (20%)	5.0	1.0	1.0	2.0
Escalabilidade ³ (20%)	4.0	4.0	2.0	2.0
Adaptabilidade ⁴ (10%)	4.0	4.0	4.0	4.0
Sensibilidade ⁵ (15%)	1.0	3.0	3.0	3.0
Flexibilidade de restrições ⁶ (15%)	5.0	4.0	2.0	4.0
Solução ótima ⁷ (20%)	4.0	4.0	4.0	4.0
Total	3.90	3.25	2.55	3.05

Tabela 4.1: DAR relativo aos algoritmos de despacho económico [34, 37]

Pela análise da tabela 4.1, é possível afirmar que o método dos Multiplicadores de *Lagrange* será o mais adequado para a resolução do problema de despacho económico. De referir que, pela análise da mesma tabela, este algoritmo é o mais rápido e mais flexível no tipo das restrições, quando comparado com todos os outros. No critério da escalabilidade é, juntamente com o algoritmo de Programação Inteira Mista, o que tem um potencial maior. Quanto à adaptabilidade, todos os algoritmos estão no mesmo patamar. O algoritmo dos Multiplicadores de *Lagrange* é o mais sensível de todos, isto é, com uma pequena variação da produção e/ou consumo, pode desencadear uma sugestão desnecessária de ligação ou desligamento. Por último, este método nem sempre atinge a solução ótima, ainda que alcance uma solução próxima da mesma.

²1 - Muito elevado; 5 - Muito baixo

³1 - Baixa capacidade; 5 - Elevada capacidade

⁴1 - Pouco adaptável; 5 - Muito adaptável

⁵1 - Muito sensível; 5 - Pouco sensível

⁶1 - Pouco flexível; 5 - Muito flexível

⁷1 - Nunca é atingida; 5 - É sempre atingida

Pelas análises qualitativa e quantitativa entre os algoritmos efetuadas, pode afirmar-se que o algoritmo dos Multiplicadores de *Lagrange* parece ser o que tem melhor desempenho, com exceção dos parâmetros da sensibilidade e do alcance da solução ótima. No sentido de colmatar a sensibilidade do método, vai ser efetuado um ajuste aquando da implementação do mesmo, não permitindo que sejam dadas sugestões desnecessárias por variações mínimas nos valores de produção e/ou consumo. Para que o algoritmo atinja sempre a solução mais aproximada à ótima, vai ser implementado, para além do algoritmo dos Multiplicadores de *Lagrange*, o Método Iterativo de *Lambda*.

Assim, para solucionar o problema do despacho económico, optar-se-á por utilizar o método dos **Multiplicadores de *Lagrange***, seguido do **Método Iterativo de *Lambda***, ambos descritos e desenvolvidos na secção 4.3.3.

4.3.3 Método dos Multiplicadores de Lagrange

O problema do despacho económico é descrito como a minimização da função de custo de produção para uma dada carga, $C_T(P_D)$, sujeita a várias restrições, quer sejam do sistema ou dos próprios geradores. O método dos Multiplicadores de *Lagrange* permite resolver problemas onde se pretende minimizar uma função objetivo sujeita a restrições de igualdade, através da construção da função de *Lagrange*. Esta função é constituída pela soma da função objetivo com as suas restrições, onde cada restrição é multiplicada por um λ , chamado **multiplicador de *Lagrange***.

Assim, seja $f(x, y)$ a função objetivo de minimização, sujeita às restrições $g(x, y)$ e $h(x, y)$, a função de *Lagrange* é dada pela equação 4.9.

$$\mathcal{L}(x, y, \lambda_1, \lambda_2) = f(x, y) + \lambda_1[g(x, y)] + \lambda_2[h(x, y)] \quad (4.9)$$

onde $\mathcal{L}(x, y)$ é a função de *Lagrange*;

$f(x, y)$ é a função objetivo de minimização;

$g(x, y)$ e $h(x, y)$ são as restrições do problema;

λ_1 e λ_2 são os multiplicadores de *Lagrange*.

No contexto do problema de despacho económico, a função objetivo de minimização será a função de custo de produção total, C_T , dada pela equação 4.10.

Função objetivo de minimização

$$C_T = \sum_{i=1}^n C_i(P_i) \quad (4.10)$$

onde C_T é a função de custo de produção total (função objetivo de minimização);

$C_i(P_i)$ é a função de custo de produção do gerador i quando fornece a potência P_i , definida pela equação 4.3;

n é o número de geradores selecionados.

Esta função de minimização está sujeita a duas restrições do sistema e uma restrição técnica dos geradores, descritas de seguida.

Restrição do balanço de potência

A primeira restrição do sistema está relacionada com o balanço de potência e refere que a soma da potência gerada por cada gerador deve ser igual à carga a suprir, da qual se obtém a equação 4.11.

$$P_D - \sum_{i=1}^n P_i = 0 \quad (4.11)$$

onde P_i é a potência gerada pelo gerador i ;
 P_D é a carga a suprir no período em causa;
 n é o número de geradores selecionados.

Restrição da reserva girante

A segunda restrição do sistema depende do valor da reserva girante⁸, ou seja, a soma da potência máxima dos geradores em funcionamento deve ser superior à soma da carga no momento da execução com o valor da reserva, pelo que se obtém a equação 4.12.

$$\sum_{i=1}^n P_{i,max} \geq P_D + R \quad (4.12)$$

onde $P_{i,max}$ é a potência máxima do gerador i ;
 P_D é a carga a suprir no período em causa;
 R é o valor da reserva girante;
 n é o número de geradores selecionados.

Restrição dos limites de funcionamento dos geradores

A restrição técnica dos geradores é imposta pelos limites de funcionamento dos mesmos. Desta forma, a potência gerada não pode ser inferior à potência mínima do gerador nem

⁸Valor definido pela diferença entre a potência máxima que é possível fornecer ao sistema e a potência que efetivamente se está a fornecer ($P_{max,ideal} - P_{max}$), num dado momento. Este valor reflete a quantidade de energia necessária para impedir que o sistema deixe de funcionar e/ou para permitir que o sistema volte a iniciar, numa situação de falha. Por isto, o valor da reserva girante atribuído deve ser definido com base num critério determinístico, como por exemplo o critério N-1 (expressa a capacidade do sistema em perder qualquer uma das unidades geradores, sem ter impacto, nomeadamente sobrecarga, nas restantes) e/ou em função de uma percentagem da carga. [22]

pode ser superior à potência máxima ideal do gerador, isto é, a potência gerada por cada um dos geradores no sistema tem que cumprir a restrição imposta pela equação 4.13.

$$P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max,ideal} \quad (4.13)$$

onde P_i é a potência gerada pelo gerador i ;

$P_{i,min}$ é a potência mínima do gerador i ;

$P_{i,max,ideal}$ é a potência máxima ideal do gerador i .

Função de *Lagrange* do despacho económico

Definidas todas as equações relevantes do sistema, é possível definir a função de *Lagrange* aplicada ao contexto do problema de despacho económico. Contudo, verifica-se que a restrição da reserva girante e a restrição imposta pelos limites de funcionamento dos geradores são restrições de desigualdades. Como o método dos multiplicadores de *Lagrange* resolve problemas sujeitos a restrições de igualdade, as restrições referidas anteriormente serão apenas verificadas no final do algoritmo, isto é, serão as equações que vão determinar a execução, ou não, do Método Iterativo de *Lambda*.

Portanto, a função de *Lagrange* será constituída pela função objetivo de minimização da equação 4.10 e pela restrição do balanço de potência definida na equação 4.11, pelo que se obtém a função da equação 4.14.

$$\mathcal{L}(P_i, \lambda) = \sum_{i=1}^n C_i(P_i) + \lambda[P_D - \sum_{i=1}^n P_i] \quad (4.14)$$

Derivadas parciais em ordem a P_i e λ

Após a definição da função de *Lagrange*, é necessário obter as derivadas parciais dessa mesma função, em ordem às variáveis do sistema, e igualá-las a zero, com o fim de se minimizar a função pretendida. No caso do problema de despacho económico, derivou-se a função em ordem a P_i e λ , tendo-se obtido as derivadas presentes nas equações 4.15.

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_i} = \frac{\partial C_T}{\partial P_i} - \lambda = 0 \quad (4.15a)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda} = P_D - \sum_{i=1}^n P_i = 0 \quad (4.15b)$$

Obtenção das funções de P_i e λ

O desenvolvimento da equação 4.15a originou uma função de P_i em ordem a λ , apresentada na equação 4.16a. Consequentemente, ao fazer a substituição desta equação em

4.15b, obteve-se a função de λ em ordem à carga P_D exibida na equação 4.16b.

$$P_i = \frac{\lambda - b_i}{2a_i} \quad (4.16a)$$

$$\lambda = \frac{P_D + \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{2a_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2a_i}} \quad (4.16b)$$

Nota: A dedução completa e detalhada das equações 4.16a e 4.16b está presente no apêndice A.

O valor de λ representa o custo incremental de cada unidade geradora i . A partir deste e da equação 4.16a, é então possível calcular o valor de potência atribuído a cada gerador, de modo a suprir a carga correspondente ao período em causa. À partida, os valores de P_i corresponderão à solução mais aproximada à ótima para o problema de despacho económico, o que significa que o custo de produção será mínimo para estes valores. No entanto, é imprescindível verificar se cada um dos valores cumpre as restrições do sistema e os limites de operação dos geradores.

Descrição e diagrama de fluxo

Na figura 4.3 está representado o fluxo do microprocesso de despacho económico, cuja descrição é efetuada de seguida.

O processo de despacho económico é caracterizado por atribuir um valor de potência a cada gerador, de modo a minimizar o custo de produção total e suprir a procura de energia no momento de execução do processo. Para tal, antes de calcular os valores pretendidos, é necessário calcular o valor de λ , definido na equação 4.16b. Após este cálculo, estão reunidas as condições para se proceder à determinação do valor de potência a atribuir a cada gerador, pela equação 4.16a.

Calculados estes valores, e como referido anteriormente, é estritamente necessário verificar se as restrições definidas pelas expressões 4.11, 4.12 e 4.13 são cumpridas.

$$P_D - \sum_{i=1}^n P_i = 0 \quad (4.11)$$

$$\sum_{i=1}^n P_{i,max} \geq P_D + R \quad (4.12)$$

$$P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max,ideal} \quad (4.13)$$

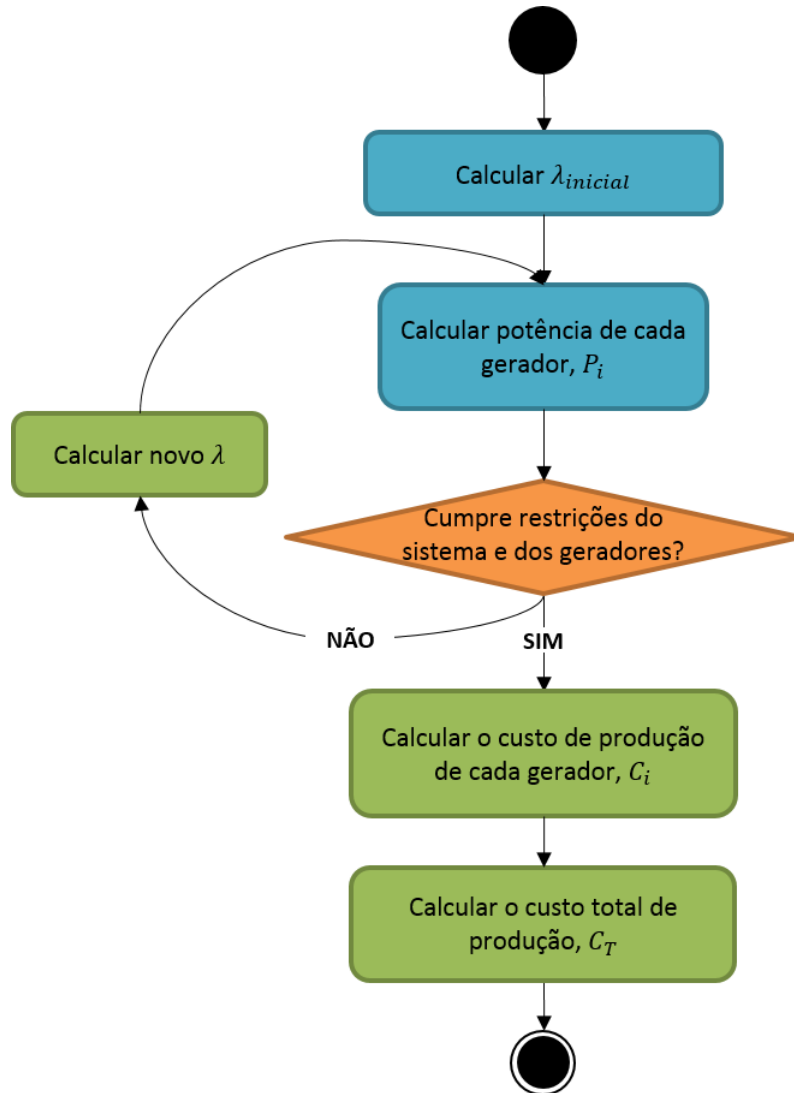


Figura 4.3: Diagrama de Fluxo do Processo de Despacho Económico

Caso as restrições sejam cumpridas, pode calcular-se o custo de produção associado a cada gerador, pela expressão 4.3, e o custo de produção total, pela equação 4.10.

$$C_i(P_i) = a_i \times P_i^2 + b_i \times P_i + c_i \quad (4.3)$$

$$C_T = \sum_{i=1}^n C_i(P_i) \quad (4.10)$$

Caso as restrições não sejam cumpridas, será necessário ajustar os valores da potência atribuída a cada gerador. Deste modo, efetua-se uma atualização ao valor de λ e voltam a calcular-se todos os valores de P_i . O valor de λ é, então, atualizado segundo o Método Iterativo de *Lambda*.

Método de Iterativo de *Lambda*

O Método Iterativo de *Lambda* consiste na atualização do valor de λ . Assim, sendo (k) o número da iteração atual, $(k - 1)$ o número da iteração anterior e $(k + 1)$ o número da iteração seguinte, o novo valor de λ é definido pela expressão 4.17.

$$\lambda^{(k+1)} = \begin{cases} 1.1\lambda_{inicial}, & k = 1 \\ \lambda^{(k)} + (P_D + \sum_{i=1}^n P_i^{(k)}) \frac{\lambda^{(k)} - \lambda^{(k-1)}}{\sum_{i=1}^n P_i^{(k)} - \sum_{i=1}^n P_i^{(k-1)}}, & k > 1 \end{cases} \quad (4.17)$$

onde $\lambda^{(k+1)}$ é o valor de λ que se pretende calcular;

$\lambda_{inicial}$ é o valor de λ calculado a partir da equação 4.16b;

P_D é a carga a suprir no período em causa;

k é o número da iteração;

$\lambda^{(k)}$ é o valor de λ calculado na iteração (k) ;

$\lambda^{(k-1)}$ é o valor de λ calculado na iteração $(k - 1)$;

$\sum_{i=1}^n P_i^{(k)}$ é o somatório da potência atribuída a cada gerador i ,
calculado na iteração (k) ;

$\sum_{i=1}^n P_i^{(k-1)}$ é o somatório da potência atribuída a cada gerador i ,
calculado na iteração $(k - 1)$;

Em cada nova iteração, um novo valor de λ é calculado, com base no valor da carga a suprir no período em causa, na soma das potências atribuídas a cada gerador na iteração em questão e na iteração anterior, bem como nos valores de *lambda* correspondentes às mesmas iterações.

Depois de atualizado o valor de λ , são calculados, novamente, os valores de P_i dos geradores selecionados no processo de pré-despacho. Todo este procedimento é repetido até as restrições serem cumpridas.

No final deste processo, ter-se-á um conjunto de geradores com as respetivas potências que devem estar a fornecer, a fim de suprir a carga correspondente ao período em causa, com o mínimo custo de produção, cumprindo, em qualquer situação, todos os requisitos e restrições do sistema e as especificações dos geradores.

4.4 Desligamento/Redução de potência

O processo de desligamento/redução de potência é efetuado quando a produção de energia excede a procura da mesma. Este microprocesso tem como objetivo reduzir a potência dos geradores termoeletricos, ou se possível desligá-los, no sentido de reduzir a potência em excesso que está a ser produzida. Deste modo, rentabiliza-se ao máximo a

produção de energia convencional e reduzem-se os custos de produção, sem nunca pôr em causa as restrições técnicas dos geradores e do sistema.

Este processo tem por base um algoritmo de seleção que tem em conta, entre outros, as características dos geradores e os valores da produção convencional necessária durante um período de tempo definido. O algoritmo de seleção escolhido é semelhante ao aplicado no pré-despacho e no despacho económico (descritos nas secções 4.2.1 e 4.3.3, respetivamente). No entanto, neste caso, em vez da ligação de geradores procede-se ao seu desligamento e, ao contrário do aumento de potência dos geradores em funcionamento, reduz-se a potência dos mesmos. No final do processo, ter-se-á um conjunto de geradores que devem ser desligados ou cuja potência gerada deve ser reduzida para um valor definido.

4.4.1 Descrição e diagrama de fluxo

Para o desligamento/redução de potência foi, então, escolhido um algoritmo que seleciona os geradores em função do seu rácio económico e dos seus limites de operação, cujo diagrama de fluxo é apresentado na figura 4.4 e descrito de seguida.

Ordenar geradores em funcionamento pelo maior rácio económico

Para iniciar este processo, deve, à partida, selecionar-se os geradores que estão em funcionamento, uma vez que apenas estes serão relevantes no decorrer deste microprocesso. De seguida, este conjunto de geradores deve ser ordenado pelo maior rácio económico, de acordo com a equação 4.5.

$$r_i = \frac{a_i^2 \times b_i}{c_i} + \frac{c_i}{\frac{1}{a_i^2} \times \frac{1}{b_i}} + SC_i \quad (4.5)$$

Desligar geradores com maior rácio

Depois de ordenar os geradores, começa por se verificar se é possível desligá-los. Para tal, escolhe-se o gerador com maior rácio económico, uma vez que é o gerador em funcionamento que tem mais interesse em ser desligado, devido ao seu elevado custo de produção. Como referido na secção 4.2.1, cada gerador tem associado um tempo mínimo de funcionamento, $T_{ON,min}$, que deve ser respeitado, de modo a manter a eficiência do gerador. Assim, antes de desligar o gerador, deve verificar-se se este tem um tempo de funcionamento, T_{ON} , superior ao tempo anteriormente referido (como mostra a equação 4.1).

$$T_{i,ON} \geq T_{i,ON,min} \quad (4.1)$$

Para além desta restrição, o gerador só deve ser desligado se a potência que está, no momento, a gerar não for superior ao valor da carga que está em excesso. Para tal, deve cumprir a condição definida pela equação 4.18.

$$P_i \leq P_{D,excesso} \quad (4.18)$$

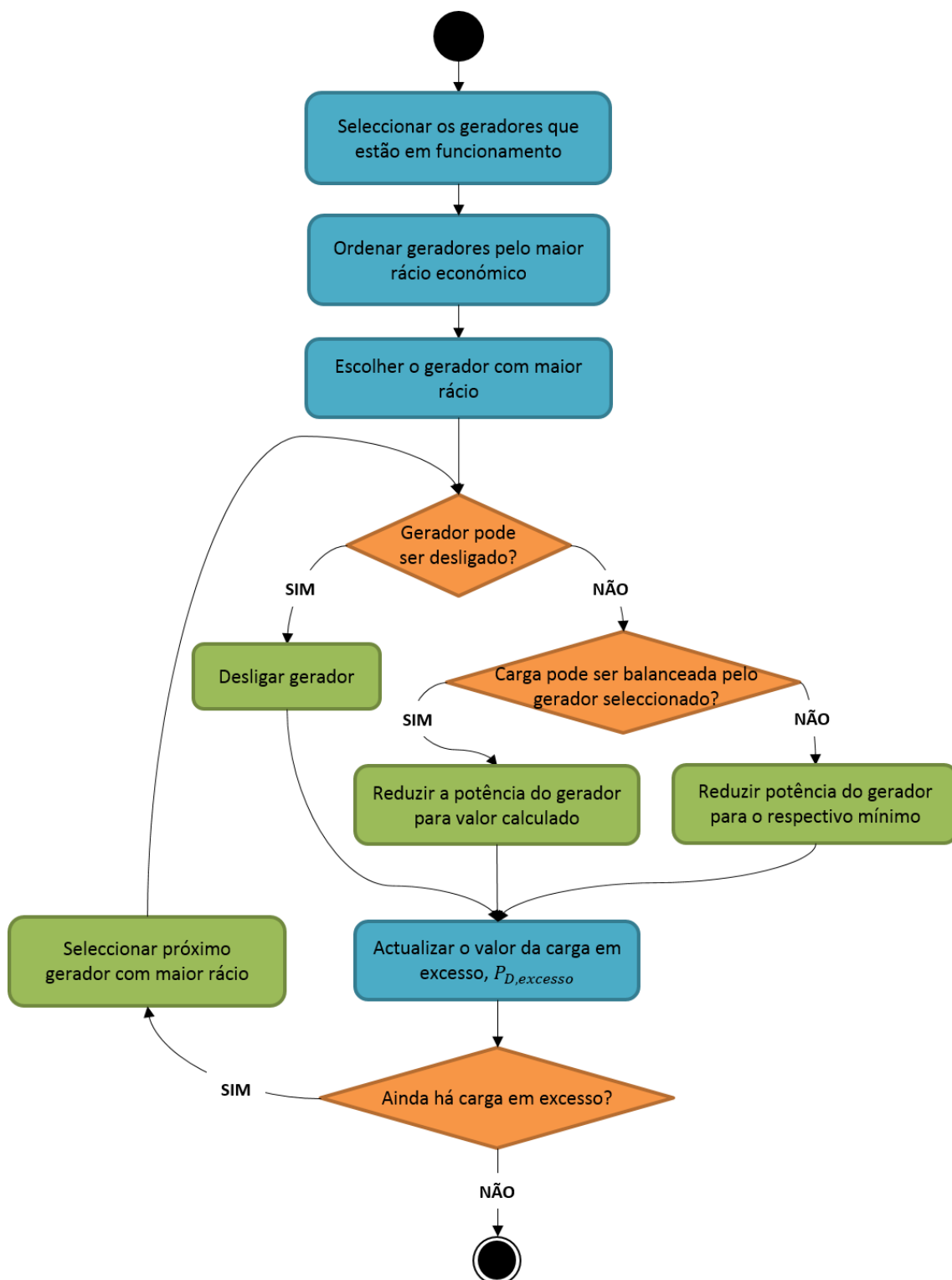


Figura 4.4: Diagrama de Fluxo do Processo de Desligamento/Redução de Potência

onde P_i é a potência gerada pelo gerador i ;
 $P_{D,excesso}$ é a carga em excesso.

Se o gerador em causa cumprir as duas restrições anteriores, o mesmo pode ser desligado. Portanto, e para este caso, o gerador deve ser adicionado ao conjunto de geradores selecionados, assim como a respetiva potência (dada pela expressão 4.19) que deverá fornecer. Para além disso, o valor da carga excedente, $P_{D,excesso}$ deve ser atualizado para o valor calculado pela equação 4.20.

$$P_{i,t+1} = 0 \quad (4.19)$$

$$P_{D,excesso,novo} = P_{D,excesso} - P_{i,t} \quad (4.20)$$

onde $P_{i,t+1}$ é a potência que o gerador i deve produzir no próximo intervalo de tempo;
 $P_{D,excesso,novo}$ é o valor atualizado da carga em excesso;
 $P_{D,excesso}$ é a carga em excesso;
 $P_{i,t}$ é a potência produzida pelo gerador i no intervalo de tempo atual.

No caso do gerador não cumprir as condições 4.1 e 4.18, deve verificar-se se é possível reduzir a sua potência gerada.

Reduzir potência aos geradores com maior rácio

Na impossibilidade de desligar um gerador, deve averiguar-se se há possibilidade de reduzir a potência fornecida pelo mesmo.

Antes de reduzir a potência que um gerador está a produzir, deve confirmar-se, em qualquer situação, que a mesma não ultrapassa o limite inferior, P_{min} , do referido gerador. Assim, pode dividir-se este procedimento em duas situações.

No **primeiro caso**, deve verificar-se se o resultado da subtração do valor da carga em excesso, $P_{D,excesso}$, à potência fornecida pelo gerador i , P_i , não é inferior à potência mínima, P_{min} , do mesmo. Portanto, para esta situação, o gerador deve cumprir a condição presente na equação 4.21.

$$P_i - P_{D,excesso} \geq P_{i,min} \quad (4.21)$$

onde P_i é o valor da potência gerada pelo gerador i ;
 $P_{D,excesso}$ é a carga em excesso;
 $P_{i,min}$ é a potência mínima do gerador i .

Caso esta condição seja cumprida pelo gerador em causa, significa que toda a carga em excesso, $P_{D,excesso}$, vai ser suprimida por esse gerador. Por isso, adiciona-se o gerador ao conjunto de geradores selecionados, juntamente com a potência definida pela expressão

4.22 que deverá gerar, e atualiza-se o valor da carga excedente, de acordo com 4.23.

$$P_{i,t+1} = P_{i,t} - P_{D_{excesso}} \quad (4.22)$$

$$P_{D_{excesso,novo}} = 0 \quad (4.23)$$

onde $P_{i,t+1}$ é a potência que o gerador i deve produzir no próximo intervalo de tempo;

$P_{i,t}$ é a potência produzida pelo gerador i no intervalo de tempo atual;

$P_{D_{excesso}}$ é a carga em excesso;

$P_{D_{excesso,novo}}$ é o valor atualizado da carga em excesso.

No caso da restrição 4.21 não ser satisfeita, significa que o valor da carga em excesso, $P_{D_{excesso}}$, não pode ser suprimido por apenas um gerador, o que resulta na segunda situação.

O **segundo caso** ocorre se o resultado da subtração do valor da carga em excesso, $P_{D_{excesso}}$, à potência fornecida pelo gerador i , P_i , for inferior à potência mínima, $P_{i,min}$, do mesmo. Neste caso, e por incumprimento da condição imposta pela equação 4.21, facilmente se deduz que o gerador em causa deve ser adicionado ao conjunto dos geradores selecionados, a correspondente potência fornecida, P_i , deve ser reduzida ao seu limiar inferior, $P_{i,min}$, como é possível verificar na expressão 4.24, e que o valor da carga excedente, $P_{D_{excesso}}$, deve ser atualizado, conforme definido na equação 4.25.

$$P_{i,t+1} = P_{i,min} \quad (4.24)$$

$$P_{D_{excesso,novo}} = P_{D_{excesso}} - (P_{i,t} - P_{i,min}) \quad (4.25)$$

onde $P_{i,t+1}$ é a potência que o gerador i deve produzir no próximo intervalo de tempo;

$P_{i,min}$ é a potência mínima do gerador i ;

$P_{D_{excesso}}$ é a carga em excesso;

$P_{D_{excesso,novo}}$ é o valor atualizado da carga em excesso.

Verificar o valor da carga em excesso, $P_{D_{excesso}}$

Com a execução das duas etapas anteriores (desligamento ou redução de potência de um gerador) obteve-se um novo valor da carga excedente, $P_{D_{excesso}}$. Assim, caso este valor ainda seja superior a 0 (zero), deve efetuar-se o mesmo procedimento para o próximo gerador com maior rácio económico, até se percorrer todos os geradores em funcionamento. No caso de ser igual a 0 (zero), o processo de desligamento/redução de potência de geradores termina, tendo resultado num conjunto de geradores com novos valores de potência que deverão fornecer.

4.5 Resumo

O Sistema de Despacho (SD) consiste no balanceamento de energia entre a oferta e a procura. Em termos de oferta, existem dois tipos de produção: convencional e renovável. A produção renovável é caracterizada pela interruptibilidade das fontes de energia e pelas constantes variações meteorológicas que se verificam, o que causa uma grande instabilidade na rede elétrica, quer ao nível da frequência ou da tensão. A produção convencional tem origem, maioritariamente, em centrais termoelétricas, marcadas pela utilização de combustíveis fósseis como fontes primárias de energia e pelos elevados custos de geração. Ao nível do consumo energético, este é oriundo tanto de consumidores particulares como de empresas e fábricas, e as flutuações no seu valor devem-se, principalmente, à sazonalidade e à tipificação semanal.

Uma vez que a produção renovável depende, essencialmente, de condições meteorológicas, o processo de despacho terá influência, apenas, sobre os grupos de produção convencional. Este processo está dividido, essencialmente, em três microprocessos:

Pré-Despacho Processo desencadeado pela insuficiência de produção convencional, face ao consumo horário. Tem como objetivo restringir o conjunto dos geradores existentes no sistema, com base nas suas especificações técnicas, tais como o tempo mínimo de funcionamento e os limites, mínimo e máximo, de produção dos geradores.

Despacho Económico Processo executado caso hajam geradores selecionados no processo de pré-despacho. Atribui valores de produção a cada um dos geradores selecionados anteriormente, recorrendo ao método dos Multiplicadores de *Lagrange* e ao Método Iterativo de *Lambda*.

Desligamento/Redução de potência Processo que ocorre se o valor de produção convencional exceder o necessário para satisfazer as necessidades de consumo. Verifica se é possível desligar algum dos geradores em funcionamento no momento de execução do processo e, caso contrário, averigua a possibilidade de reduzir a potência fornecida por algum desses geradores, de acordo com o que é mais economicamente viável.

No final do processo de despacho, e para cada intervalo de tempo, ter-se-á uma solução que reduz os custos de produção de energia a um valor próximo do mínimo possível, seja pela ligação/aumento de potência, quando a produção não é suficiente face ao consumo, ou pelo desligamento/redução de potência, no caso do valor do consumo ser inferior à quantidade de energia que está a ser produzida, no momento de execução do processo.

Depois de desenvolvido todo o processo de despacho, procedeu-se à sua implementação, recorrendo a Java (linguagem de programação orientada a objetos).

Capítulo 5

Resultados

Após o desenvolvimento e implementação dos algoritmos presentes na secção 4.1, estão reunidas as condições para se proceder à demonstração do resultado dos mesmos, no sentido de comprovar a sua adequabilidade a sistemas isolados.

Para atestar a eficiência e aplicabilidade dos algoritmos escolhidos como solução para o problema do despacho, em sistemas energeticamente isolados, criaram-se alguns cenários para simulação do Sistema de Despacho (SD), cuja descrição e resultados estão descritos ao longo do presente capítulo. Todos os dados, tanto de produção como de consumo, foram fornecidos pela Novabase.

5.1 Dados de produção

Para se proceder à simulação do Sistema de Despacho (SD) é estritamente necessário conhecer a produção de cada unidade geradora ou dispor de dados que permitam calcular esses valores.

Ao nível da **produção renovável**, nesta dissertação não vão ser efetuados cálculos para se obterem esses valores. Apesar dos valores de produção renovável serem essenciais para simular e testar o Sistema de Despacho (SD), o cálculo dos mesmos a partir de previsões meteorológicas não pertence ao âmbito da mesma. No entanto, e sempre que se justificar, estes valores serão gerados "aleatoriamente". Para tal, será criada uma sequência de valores, não puramente aleatória, mas que terá por base um valor percentual da sequência de valores correspondente ao consumo de energia. Esta percentagem poderá estar compreendida entre 10%, valor aproximado da penetração atual de fontes de energia renovável em Cabo Verde, e 50%, valor de penetração esperado para o ano de 2020 no arquipélago, como referido na secção 2.2.2. Ao testar o Sistema de Despacho (SD) utilizando estes dois valores limite (mínimo e máximo teóricos, respetivamente) para obtenção dos valores de produção renovável, poderá confirmar-se a aplicabilidade dos algoritmos escolhidos como solução para o problema de despacho em sistemas energéticos isolados.

A **produção convencional** provém da geração de energia por parte de grupos termoeletricos. Portanto, para se obterem os valores de produção convencional pretendidos, foi fornecido um conjunto de informações acerca dos geradores termoeletricos em operação na ilha de Santiago, em Cabo Verde, apresentados na tabela 5.1.

Gerador	Tipo ¹	a	b	c	P_{min}	$P_{max,ideal}$	P_{max}	r_i	$T_{ON,min}$
1	G	0.052	1.97	63	0.0320	0.1280	0.160	335 678	1.5
2	G	0.040	1.62	42	0.0800	0.3200	0.400	108 926	2
3	G	0.042	1.62	42	0.0818	0.3272	0.409	120 091	2
4	G	0.045	1.76	53	0.1120	0.4480	0.560	188 959	2
5	G	0.052	1.61	49	0.1296	0.5180	0.648	213 407	1.5
6	G	0.065	1.65	51	0.2176	0.8704	1.088	355 670	1.5
7	G	0.071	1.66	69	0.2400	0.9600	1.200	577 517	0.5
8	G	0.071	1.66	69	0.2400	0.9600	1.200	577 517	0.5
9	G	0.063	1.67	68	0.2720	1.0880	1.360	450 817	1
10	G	0.063	1.67	68	0.2720	1.0880	1.360	450 817	1
11	G	0.066	1.65	71	0.3200	1.2800	1.600	510 407	0.5
12	G	0.066	1.65	71	0.3200	1.2800	1.600	510 407	0.5
13	G	0.065	1.63	75	0.4720	1.8880	2.360	516 598	0.5
14	F	0.045	1.61	41	0.5066	2.0264	2.533	133 750	1
15	F	0.045	1.61	41	0.5066	2.0264	2.533	133 750	1
16	F	0.043	1.50	35	1.1162	4.4648	5.581	97 152	1
17	F	0.043	1.50	35	1.1162	4.4648	5.581	97 152	1
18	F	0.046	1.29	34	1.4874	5.9496	7.437	92 888	0.5
19	F	0.046	1.29	34	1.4874	5.9496	7.437	92 888	0.5

Tabela 5.1: Dados dos geradores em operação na ilha de Santiago, em Cabo Verde

O valor da primeira coluna da tabela 5.1, intitulada de **Gerador**, servirá para identificar o gerador termoeletrico. A coluna **Tipo** contém o tipo de combustível do gerador em causa: F para fuelóleo e G para Gasóleo). As três colunas seguintes contém os valores

¹F - Fuelóleo; G - Gasóleo

dos coeficientes **a**, **b** e **c**, respetivamente, da função de custo de produção de um gerador. Estes são obtidos aquando da fabricação dos geradores e são fornecidos pelos fabricantes dos mesmos. Os valores de P_{min} , $P_{max,ideal}$ e P_{max} são os valores de potência mínima, máxima ideal e máxima, em MW, respetivamente, do gerador considerado. O valor presente na penúltima coluna da tabela, r_i , representa o rácio económico desse gerador, multiplicado por um fator de 10^6 , de modo a facilitar a sua leitura e análise. Uma vez que o valor do custo de arranque, SC , é muito semelhante para todos os geradores e é adicionado da mesma forma para calcular o rácio económico de qualquer gerador (de acordo com a equação 4.5), concluiu-se que este valor não terá influência no processo. Na última coluna, $T_{ON,min}$, está definido o tempo mínimo de funcionamento, em horas, do gerador em causa.

Da análise da tabela anterior, é possível retirar algumas conclusões. O valor da potência mínima que o sistema pode fornecer, $P_{T,min}$, corresponde à menor potência mínima, P_{min} , de entre todos os geradores. O valor da potência máxima ideal que o sistema pode gerar, $P_{T,max,ideal}$, é definido pela soma da potência máxima ideal, $P_{max,ideal}$, de todos os geradores do conjunto. A potência máxima que o sistema pode produzir, $P_{T,max}$, é resultado do somatório da potência máxima, P_{max} que cada gerador consegue fornecer. Por último, o valor máximo da reserva girante, R_{max} , é descrito como a diferença entre as potências máxima e máxima ideal, referidas anteriormente. Os valores de $P_{T,min}$, $P_{T,max,ideal}$, $P_{T,max}$ e R_{max} estão presentes, respetivamente, nas equações 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4.

$$P_{T,min} = 0.0320MW \quad (5.1)$$

$$P_{T,max,ideal} = 36.0376MW \quad (5.2)$$

$$P_{T,max} = 45.0470MW \quad (5.3)$$

$$R_{max} = 9.0094MW \quad (5.4)$$

Os valores apresentados na tabela 5.1 permitem efetuar todos os cálculos relacionados com geradores termoeletricos, desde a potência que cada um deve estar a gerar ao seu custo de produção de energia, assim como o custo total, para um dado intervalo de tempo.

Uma vez que os algoritmos envolvem, em algum momento, a ordenação dos geradores pelo seu rácio económico, as expressões 5.5 e 5.6 representam os identificadores numéricos dos geradores ordenados de acordo com o menor e o maior rácio, respetivamente.

$$18, 19, 16, 17, 2, 3, 14, 15, 4, 1, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 7, 8 \quad (5.5)$$

$$8, 7, 13, 12, 11, 10, 9, 6, 5, 1, 4, 15, 14, 3, 2, 17, 16, 19, 18 \quad (5.6)$$

Uma vez que os geradores são ordenados recorrendo a um método existente em Java², a ordem dos geradores que têm o mesmo rácio económico pode não ser exatamente a enumerada nas expressões anteriores³. Estas expressões vão facilitar a verificação da validade de alguns resultados, como se constatará adiante.

²java.util.Collections.sort

³Exemplo: Na ordenação, o geradores 18 e 19 podem aparecer pela ordem **19, 18** em vez de 18, 19.

Após uma explicação detalhada da forma como se pretende obter os valores de produção de energia, quer renovável quer convencional, estão adquiridos uma parte dos dados de entrada do Sistema de Despacho (SD) necessários para a sua simulação.

5.2 Dados de consumo

Para simular o Sistema de Despacho (SD) é imprescindível ter uma curva com os valores do consumo horário, isto é, uma curva com a carga que é necessário balancear. Para tal, consideraram-se dois diagramas de carga, correspondentes a cada estação típica do arquipélago (chuvosa e seca).

O **primeiro diagrama de carga**, representado na figura 5.1, foi registado no dia 10 de setembro de 2013, na Ilha de Santiago, em Cabo Verde, caracterizado por ser um dia tipicamente chuvoso.

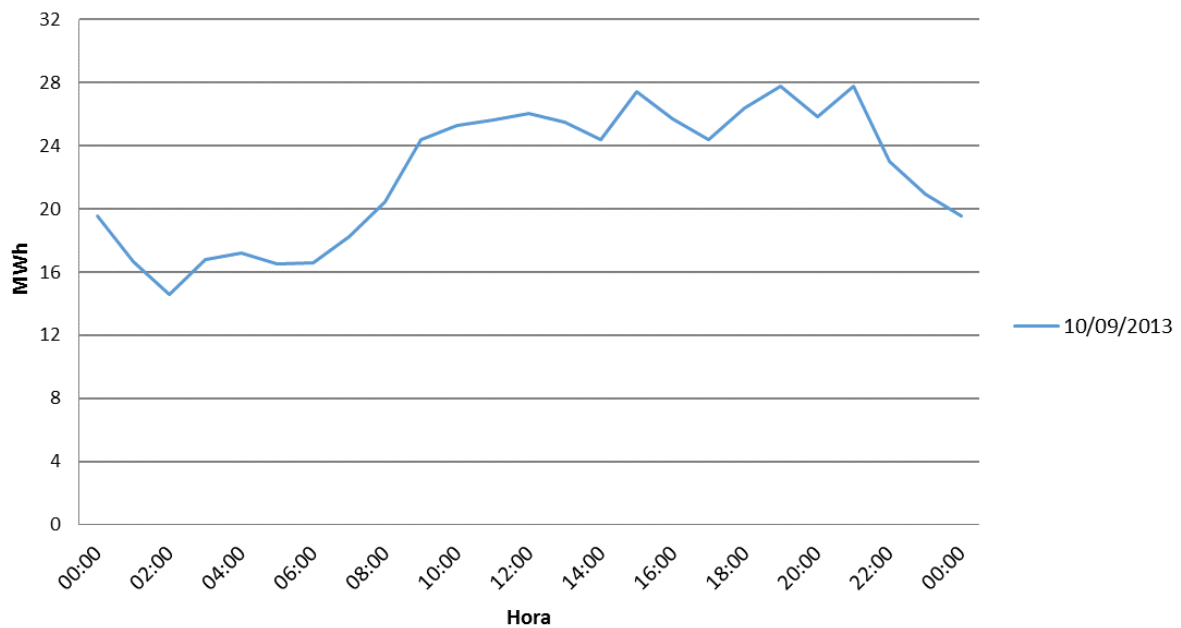


Figura 5.1: Diagrama de Carga de um dia tipicamente chuvoso (10 de setembro de 2013)

É possível verificar, pela análise deste diagrama, que os valores do consumo horário não apresentam variações bruscas. Para além disso, o **valor mínimo** de consumo é de 14.555 MW (registado às 2:00 horas) e o **valor máximo** de 27.802 MW (verificado às 19:00 horas). Assim, e por comparação aos valores mínimo e máximo, $P_{T,min}$ e $P_{T,max,ideal}$, respetivamente, de produção possíveis, obtidos na secção 5.1, é possível afirmar que as necessidades de consumo podem ser supridas com o fornecimento de energia proveniente dos grupos termoelétricos apresentados.

O **segundo diagrama de carga**, presente na figura 5.2, registou-se num dia tipicamente seco (dia 6 de novembro de 2013), na Ilha de Santiago, em Cabo Verde.

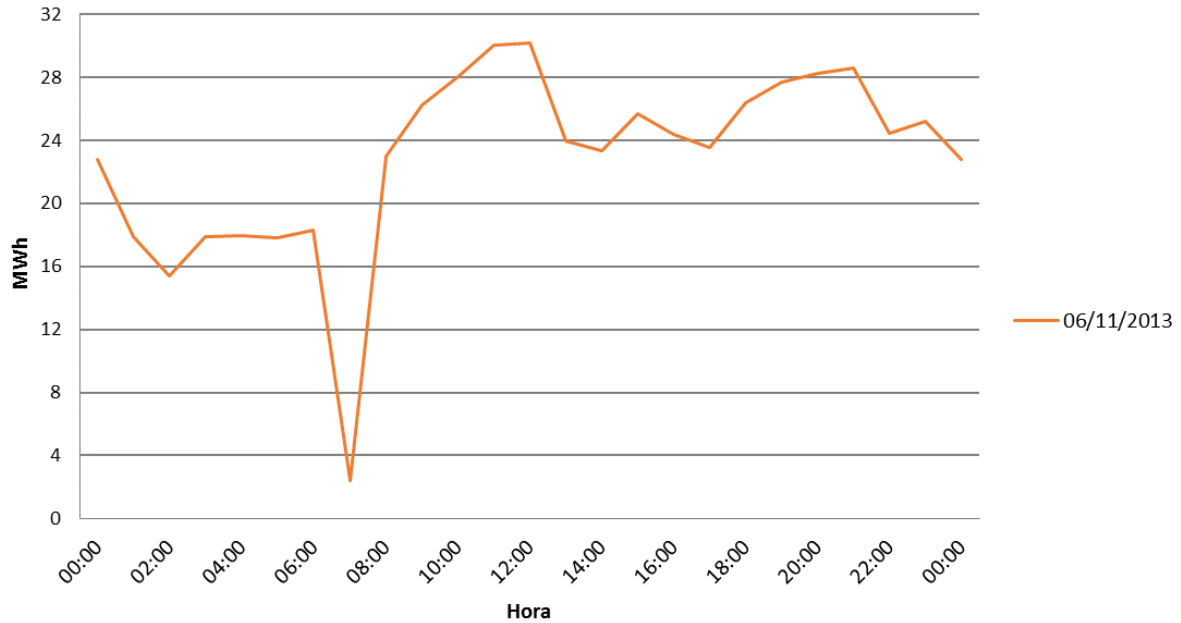


Figura 5.2: Diagrama de Carga de um dia tipicamente seco (6 de novembro de 2013)

Ao contrário do diagrama da figura 5.1, este apresenta variações mais bruscas nos valores de consumo. É possível visualizar uma redução drástica do valor da carga às 7:00 horas desse dia, que marca o **valor mínimo** de 2.4 MW deste diagrama. Por outro lado, o **valor máximo** desse dia, 30.164 MW, registou-se às 12:00 horas. De modo semelhante ao anterior, por comparação com os valores mínimo e máximo, $P_{T,min}$ e $P_{T,max,ideal}$, respetivamente, de produção possíveis, obtidos na secção 5.1, pode assegurar-se que os valores de carga presentes no diagrama da figura 5.2 podem ser supridos com a energia produzida pelos grupos termoeletrônicos anteriormente enunciados.

Ao efetuar a simulação do Sistema de Despacho (SD) para estes dois diagramas de carga (figuras 5.1 e 5.2), separadamente, será possível inferir a aplicabilidade dos algoritmos implementados na ilha de Santiago, como exemplo de um sistema energeticamente isolado.

5.3 Reserva girante

A reserva girante, apesar de não pertencer nem à produção nem ao consumo de energia, constitui uma componente significativa num sistema energeticamente isolado e a sua sequência de valores deve ser adicionada aos dados de consumo, de forma a constituir o valor necessário para o cumprimento da restrição imposta pela mesma.

Como referido na secção 4.3.3, o valor da reserva girante pode ser definido, de entre outros critérios, em função de uma percentagem do valor da carga. Este foi, então, o método escolhido para a atribuição de valores à reserva.

Assim, são definidas duas percentagens, mínima de 5% e máxima de 30% [14], para a obtenção dos valores da reserva. Ao efetuar a simulação do Sistema de Despacho (SD) com estes dois valores percentuais, conseguirá deduzir-se a adequabilidade dos algoritmos escolhidos como solução para o problema do despacho em sistemas energéticos isolados, como é a ilha de Santiago.

Após uma explicação do processo de aquisição de todos os dados de entrada necessários, estão criadas as condições para se proceder à simulação do Sistema de Despacho (SD).

Apesar dos dados de consumo variarem de hora a hora, a simulação será efetuada a cada trinta minutos. Assim, no instante em que o valor de consumo se alterar, serão atribuídos os valores de potência gerada associados a cada gerador e, no instante em que esse valor se mantiver, verificar-se-á o seu resultado ou serão efetuados os ajustes necessários à produção térmica. Para além disso, durante o processo serão efetuados arredondamentos a quatro casas decimais, pelo que, por vezes poderão aparecer desvios de 0.0001, associados a esses arredondamentos. Assim, aquando das verificações de superioridade e inferioridade, esse desvio é considerado para evitar ligar/desligar geradores desnecessariamente.

Nas secções seguintes, serão descritos, com detalhe, os diferentes cenários de teste para os quais se vai demonstrar a eficiência e a aplicabilidade dos algoritmos escolhidos, começando pelas condições mais simples e terminando com as mais complexas.

5.4 1º Cenário: Produção convencional (apenas)

Nesta secção, pretende detalhar-se as condições em que vai ser efetuado o primeiro cenário de teste e mostrar os resultados obtidos.

O primeiro cenário de teste será, então, o que é executado nas condições mais simples. Para tal, considera-se que apenas existe produção convencional, isto é, o valor da produção renovável é nulo, e executa-se todo o processo para os dois diagramas de carga existentes, bem como para os dois valores de reserva girante referidos na secção 5.3.

5.4.1 Dia chuvoso

Para este cenário de teste utilizaram-se para dados de produção apenas os associados aos geradores de produção convencional (termoelétricos), para dados de consumo o diagrama de carga de um dia tipicamente chuvoso e para a reserva girante os valores correspondentes a 5% e 30% do valor do consumo. Considera-se, ainda, que todos os geradores estão desligados até ao início da execução do processo e, a partir desse momento, os respetivos valores de geração de energia, em cada instante, estão dependentes dos valores calculados pelo algoritmo.

Reserva a 5%

O primeiro caso foi simulado com o valor da **reserva a 5%**. Assim, o conjunto de valores iniciais, registados às 0:00 horas é definido por:

$$\text{Produção Convencional} = 0 \text{ MW}$$

$$\text{Consumo} = 19.522 \text{ MW}$$

$$\text{Produção Renovável} = 0 \text{ MW}$$

$$\text{Reserva} = 0.9761 \text{ MW}$$

Como o valor do consumo é superior ao valor da produção, o processo vai encaminhar-se para o pré-despacho e, posteriormente, para o despacho económico.

No pré-despacho, começa por se obter o período de tempo durante o qual o valor do consumo se vai manter razoavelmente estável. Para tal, definiu-se um *threshold* de 1 MW. O valor do consumo registado à 1:00 hora foi de 16.666 MW, pelo que a diferença absoluta entre este valor e o valor inicial (2,856 MW) é superior ao *threshold*. Assim, o período de baixa oscilação para o primeiro instante corresponde, exatamente, a uma hora e selecionam-se todos os geradores cujo tempo mínimo de funcionamento, $T_{ON,min}$ não ultrapasse este valor, isto é, todos os geradores cujo $T_{ON,min}$ seja 0.5 ou 1 hora (geradores 7 a 19). De seguida, ordenam-se estes geradores pelo menor rácio económico e efetuam-se todas as combinações possíveis, cuja soma das potências atribuídas seja capaz de suprir a carga necessária (consumo). Após a execução deste método de combinações, verifica-se que todos os geradores anteriores são selecionados para o despacho económico.

Uma vez que os geradores se encontram todos desligados, o processo de despacho económico vai proceder à atribuição de um valor correspondente à potência que estes devem fornecer. Desta forma, começa por se calcular o valor de λ , definido na equação 4.16b. Para os geradores pré-selecionados, $\lambda \simeq 1.7135$, portanto, os valores de potência atribuídos a cada gerador, P_i , calculados segundo a expressão 4.16a, são:

$$P_7 = 0.3769 \text{ MW}$$

$$P_{11} = 0.4812 \text{ MW}$$

$$P_8 = 0.3769 \text{ MW}$$

$$P_{12} = 0.4812 \text{ MW}$$

$$P_9 = 0.3454 \text{ MW}$$

$$P_{13} = 0.6424 \text{ MW}$$

$$P_{10} = 0.3454 \text{ MW}$$

$$P_{14} = 1.1502 \text{ MW}$$

$$P_{15} = 1.1502 \text{ MW}$$

$$P_{18} = 4.6034 \text{ MW}$$

$$P_{16} = 2.4827 \text{ MW}$$

$$P_{17} = 2.4827 \text{ MW}$$

$$P_{19} = 4.6034 \text{ MW}$$

A soma dos valores anteriores é 19.522 MW, ou seja, é o valor exato necessário para suprir a procura de energia. O somatório da potência máxima de cada um dos geradores anteriores é 41.782 MW, valor superior à soma do valor de consumo com o valor da reserva girante (20.4981 MW). Para além disso, cada um dos valores obtidos está entre os limites, mínimo e máximo ideal, de produção do gerador. Deste modo, estão cumpridas as restrições, quer do sistema quer dos geradores, para este intervalo de tempo.

O próximo valor de consumo, verificado à 1:00 hora, é de 16.666 MW. Este valor é inferior ao valor da produção de energia, pelo que o processo será conduzido para o desligamento/redução de potência de geradores. Portanto, os geradores que estão em funcionamento são ordenados pelo maior rácio económico, de maneira a que se desligue ou reduza a potência fornecida pelos geradores com maior custo de produção. Para esta situação, e como o tempo efetivo de funcionamento dos geradores é igual ao seu tempo mínimo de funcionamento, desligam-se os geradores 7, 8, 13, 11, 12 e 9 e reduz-se a potência fornecida aos geradores 10 e 14. Assim, permanecem em funcionamento os geradores:

$$P_{10} = 0.2720 \text{ MW}$$

$$P_{17} = 2.4827 \text{ MW}$$

$$P_{14} = 1.0716 \text{ MW}$$

$$P_{18} = 4.6034 \text{ MW}$$

$$P_{15} = 1.1502 \text{ MW}$$

$$P_{16} = 2.4827 \text{ MW}$$

$$P_{19} = 4.6034 \text{ MW}$$

A soma das potências fornecidas pelos grupos termoeletricos anteriores é, agora, 16.666 MW, valor que satisfaz o consumo de energia para este período de tempo. A restrição da reserva girante é, igualmente, satisfeita, uma vez que a soma do consumo com o seu valor (17.499 MW) não ultrapassa o valor da soma das potências máximas (32.462 MW) dos geradores em causa.

Para o período de tempo compreendido entre as 2:00 e 3:00 horas, repete-se o procedimento anterior para um valor de consumo de 14.555 MW, por este ser igualmente inferior ao valor da produção de energia.

O valor da procura de energia/consumo no intervalo entre as 3:00 e 4:00 horas (16.780 MW) aumentou em relação ao anterior, pelo que o processo seguirá pelo despacho económico, após uma pré-seleção de geradores no processo de pré-despacho. Os geradores selecionados no pré-despacho são, neste caso, irrelevantes, uma vez que se dá prioridade ao aumento de potência, em detrimento da ligação de geradores, e os geradores em funcionamento têm

capacidade para suprir o valor do consumo de energia. Assim, apresentam-se os respectivos valores de geração para cada um dos geradores em funcionamento neste período de tempo:

$$P_{15} = 0.5066 \text{ MW}$$

$$P_{18} = 5.4822 \text{ MW}$$

$$P_{16} = 2.4827 \text{ MW}$$

$$P_{17} = 2.3589 \text{ MW}$$

$$P_{19} = 5.9496 \text{ MW}$$

Uma vez mais, neste período todas as restrições são cumpridas pois, para além dos valores atribuídos a cada gerador estarem dentro dos limites técnicos do gerador, a soma das potências geradas (16.780 MW) é igual ao valor do consumo e o somatório das potências máximas de cada gerador (28.569 MW) é superior à soma do valor do consumo com o valor da reserva (17.619 MW).

Nestes quatro intervalos de tempo foi possível verificar a correta execução do processo de despacho, quer ao nível da ligação de geradores e aumento da potência fornecida pelos mesmos, quer ao nível da sua redução ou do desligamento dos mesmos. Assim, e para este caso, apresenta-se na figura 5.3 a evolução temporal da produção de cada um dos geradores, bem como do consumo, da reserva girante e da potência máxima possível.

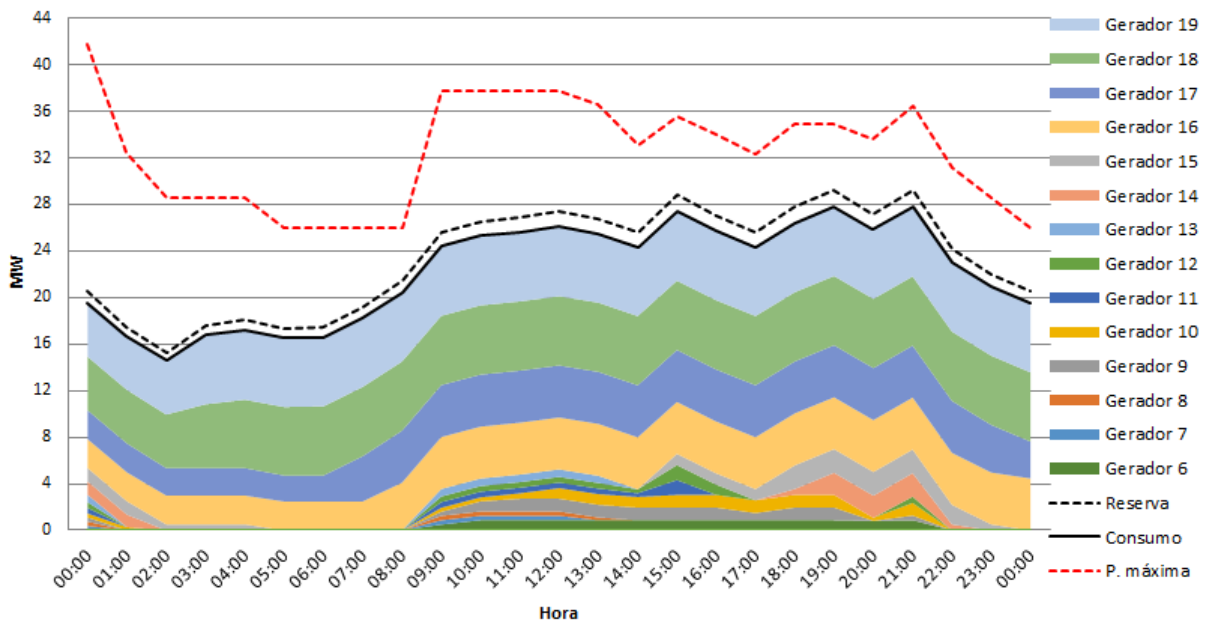


Figura 5.3: Simulação de dia chuvoso, reserva girante a 5%, sem produção renovável

Pela análise da figura anterior, é possível confirmar que se cumpriram as restrições do sistema, em todas as situações. A produção de energia conseguiu acompanhar a evolução horária do consumo e os geradores em funcionamento foram também suficientes para permitir manter o valor da reserva girante sempre válido e seguro. Além disso, sempre que foi

necessário ligar geradores (ou aumentar a sua potência) procedeu-se à ligação (ou aumento de potência) dos que tinham menor rácio económico. Por oposição, os primeiros geradores a serem desligados (ou aos quais se reduziu a sua potência) corresponderam aos de maior rácio. Assim, pode concluir-se que o Sistema de Despacho (SD) efetuou o balanço de energia, com os custos de produção tanto reduzidos quanto possível, cumprindo, em todos os instantes de tempo, quer as restrições do sistema quer dos geradores termoeletrônicos.

Reserva a 30%

O segundo caso foi testado nas mesmas condições do anterior mas, desta vez, para um valor da **reserva de 30%**.

Os valores da potência fornecida por cada um dos geradores são exatamente iguais aos valores do caso testado para a reserva a 5%, até às 8:00 horas. A partir daí, têm de entrar em funcionamento outros geradores, não devido ao valor de consumo, mas para cumprir a restrição da reserva (resultado da superioridade do seu valor, em relação ao anterior). Assim, às 8:00 horas, por exemplo, o gerador 14 é ligado e mantém-se em produção durante quinze horas, até quase ao final do dia (fim da simulação). Por comparação com o caso anterior, este gerador esteve ligado apenas cinco horas.

Na figura 5.4, encontra-se a evolução da produção dos geradores ao longo do dia e da soma das potências máximas dos mesmos, assim como a variação do consumo e, consequentemente, da reserva girante.

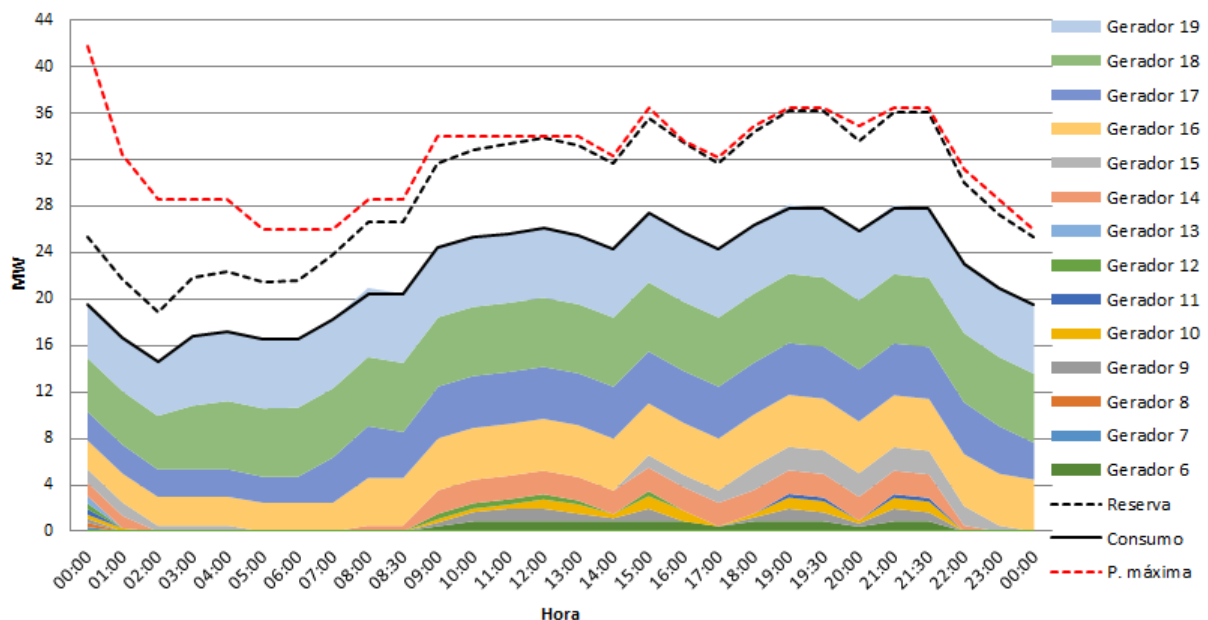


Figura 5.4: Simulação de dia chuvoso, reserva girante a 30%, sem produção renovável

Ao comparar esta figura com a figura 5.3, é possível verificar as semelhanças existentes entre as duas e, ainda, que as diferenças verificadas devem-se à diferença entre os valores da reserva utilizados.

Assim, pode concluir-se que o Sistema de Despacho (SD), para além de garantir que a produção de energia é suficiente face à procura, também garante, em todos os casos, que a restrição da reserva girante seja cumprida, ligando (à potência mínima, de modo a reduzir os custos de produção tanto quanto possível), para tal, os geradores de menor rácio económico necessários.

5.4.2 Dia seco

Por oposição à simulação para um dia tipicamente chuvoso, para este cenário de teste utilizaram-se para dados de produção apenas os associados aos geradores de produção convencional (termoelétricos), para dados de consumo o diagrama de carga de um dia tipicamente seco e para a reserva girante os valores correspondentes a 5% e 30% do valor do consumo. Considera-se, ainda, que todos os geradores estão desligados até ao início da execução do processo e, a partir desse momento, os respetivos valores de geração de energia, em cada instante, estão dependentes dos valores calculados pelo algoritmo.

Reserva a 5%

O primeiro caso foi simulado com o valor da **reserva a 5%**. Assim, o conjunto de valores iniciais, registados às 0:00 horas é definido por:

$$\text{Produção Convencional} = 0 \text{ MW}$$

$$\text{Consumo} = 22.822 \text{ MW}$$

$$\text{Produção Renovável} = 0 \text{ MW}$$

$$\text{Reserva} = 1.1411 \text{ MW}$$

Como o valor do consumo é superior ao valor da produção, o processo vai encaminhar-se para o pré-despacho e, posteriormente, para o despacho económico.

No pré-despacho, começa por se obter o período de tempo durante o qual o valor do consumo se vai manter razoavelmente estável. Para tal, definiu-se um *threshold* de 1 MW. O valor do consumo registado à 1:00 hora foi de 17.916 MW, pelo que a diferença absoluta entre este valor e o valor inicial (4,906 MW) é superior ao *threshold*. Assim, o período de baixa oscilação para o primeiro instante corresponde, exatamente, a uma hora e selecionam-se todos os geradores cujo tempo mínimo de funcionamento, $T_{ON,min}$ não ultrapasse este valor, isto é, todos os geradores cujo $T_{ON,min}$ seja 0.5 ou 1 hora (geradores 7 a 19). De seguida, ordenam-se estes geradores pelo menor rácio económico e efetuam-se todas as combinações possíveis, cuja soma das potências atribuídas seja capaz de suprir a carga necessária (consumo). Após a execução deste método de combinações, verifica-se que todos os geradores anteriores são selecionados para o despacho económico.

Uma vez que os geradores se encontram todos desligados, o processo de despacho económico vai proceder à atribuição de um valor correspondente à potência que estes devem fornecer. Desta forma, começa por se calcular o valor de λ , definido na equação

4.16b. Para os geradores pré-selecionados, $\lambda \simeq 1.9151$, portanto, os valores de potência atribuídos a cada gerador, P_i , calculados segundo a expressão 4.16a, são:

$P_7 = 0.5705 \text{ MW}$	$P_{14} = 1.4557 \text{ MW}$
$P_8 = 0.5705 \text{ MW}$	$P_{15} = 1.4557 \text{ MW}$
$P_9 = 0.5636 \text{ MW}$	$P_{16} = 2.8025 \text{ MW}$
$P_{10} = 0.5636 \text{ MW}$	$P_{17} = 2.8025 \text{ MW}$
$P_{11} = 0.6895 \text{ MW}$	$P_{18} = 4.9023 \text{ MW}$
$P_{12} = 0.6895 \text{ MW}$	$P_{19} = 4.9023 \text{ MW}$
$P_{13} = 0.8539 \text{ MW}$	

A soma dos valores anteriores é 22.822 MW, ou seja, é o valor exato necessário para suprir a procura de energia. O somatório da potência máxima de cada um dos geradores anteriores é 41.782 MW, valor superior à soma do valor de consumo com o valor da reserva girante (23.9631 MW). Para além disso, cada um dos valores obtidos está entre os limites, mínimo e máximo ideal, de produção do gerador. Deste modo, estão cumpridas as restrições, quer do sistema quer dos geradores, para este intervalo de tempo.

O próximo valor de consumo, verificado à 1:00 hora, é de 17.916 MW. Este valor é inferior ao valor da produção de energia, pelo que o processo será conduzido para o desligamento/redução de potência de geradores. Portanto, os geradores que estão em funcionamento são ordenados pelo maior rácio económico, de maneira a que se desligue ou reduza a potência fornecida pelos geradores com maior custo de produção. Para esta situação, e como o tempo efetivo de funcionamento dos geradores é igual ao seu tempo mínimo de funcionamento, desligam-se os geradores 7, 8, 13, 11, 12, 9 e 10 e reduz-se a potência fornecida ao gerador 14. Assim, permanecem em funcionamento os geradores:

$P_{14} = 1.0507 \text{ MW}$	$P_{17} = 2.8025 \text{ MW}$
$P_{15} = 1.4557 \text{ MW}$	$P_{18} = 4.9023 \text{ MW}$
$P_{16} = 2.8025 \text{ MW}$	$P_{19} = 4.9023 \text{ MW}$

A soma das potências fornecidas pelos grupos termoeletricos anteriores é, agora, 17.916 MW, valor que satisfaz o consumo de energia para este período de tempo. A restrição da reserva girante é, igualmente, satisfeita, uma vez que a soma do consumo com o seu valor (18.812 MW) não ultrapassa o valor da soma das potências máximas (31.102 MW) dos geradores em causa.

Para o período de tempo compreendido entre as 2:00 e 3:00 horas, repete-se o procedimento anterior para um valor de consumo de 15.385 MW, por este ser igualmente inferior

ao valor da produção de energia.

O valor da procura de energia/consumo no intervalo entre as 3:00 e 4:00 horas (17.880 MW) aumentou em relação ao anterior, pelo que o processo seguirá pelo despacho económico, após uma pré-seleção de geradores no processo de pré-despacho. Os geradores selecionados no pré-despacho são, neste caso, irrelevantes, uma vez que se dá prioridade ao aumento de potência, em detrimento da ligação de geradores, e os geradores em funcionamento têm capacidade para suprir o valor do consumo de energia. Assim, apresentam-se os respetivos valores de geração para cada um dos geradores em funcionamento neste período de tempo:

$$P_{16} = 2.8025 \text{ MW}$$

$$P_{18} = 5.9496 \text{ MW}$$

$$P_{17} = 3.1783 \text{ MW}$$

$$P_{19} = 5.9496 \text{ MW}$$

Uma vez mais, neste período todas as restrições são cumpridas pois, para além dos valores atribuídos a cada gerador estarem dentro dos limites técnicos do gerador, a soma das potências geradas (17.880 MW) é igual ao valor do consumo e o somatório das potências máximas de cada gerador (26.036 MW) é superior à soma do valor do consumo com o valor da reserva (18.774 MW).

Nestes quatro intervalos de tempo foi possível verificar a correta execução do processo de despacho, quer ao nível da ligação de geradores e aumento da potência fornecida pelos mesmos, quer ao nível da sua redução ou do desligamento dos mesmos. Assim, e para este caso, apresenta-se na figura 5.5 a evolução temporal da produção de cada um dos geradores, bem como do consumo, da reserva girante e da potência máxima possível.

Pela análise da figura anterior, é possível confirmar que se cumpriram as restrições do sistema, em todas as situações. A produção de energia conseguiu acompanhar a evolução horária do consumo, mesmo com a diminuição e o aumento abruptos que se registaram às 7:00 e 8:00 horas, respetivamente. Os geradores em funcionamento foram também suficientes para permitir manter o valor da reserva girante sempre válido e seguro. Além disso, sempre que foi necessário ligar geradores (ou aumentar a sua potência) procedeu-se à ligação (ou aumento de potência) dos que tinham menor rácio económico. Por oposição, os primeiros geradores a serem desligados (ou aos quais se reduziu a sua potência) corresponderam aos de maior rácio. Assim, pode concluir-se que o Sistema de Despacho (SD) efetuou o balanço de energia, com os custos de produção tanto reduzidos quanto possível, cumprindo, em todos os instantes de tempo, quer as restrições do sistema quer dos geradores termoelétricos.

Reserva a 30%

O segundo caso foi testado nas mesmas condições do anterior mas, desta vez, para um valor da **reserva de 30%**.

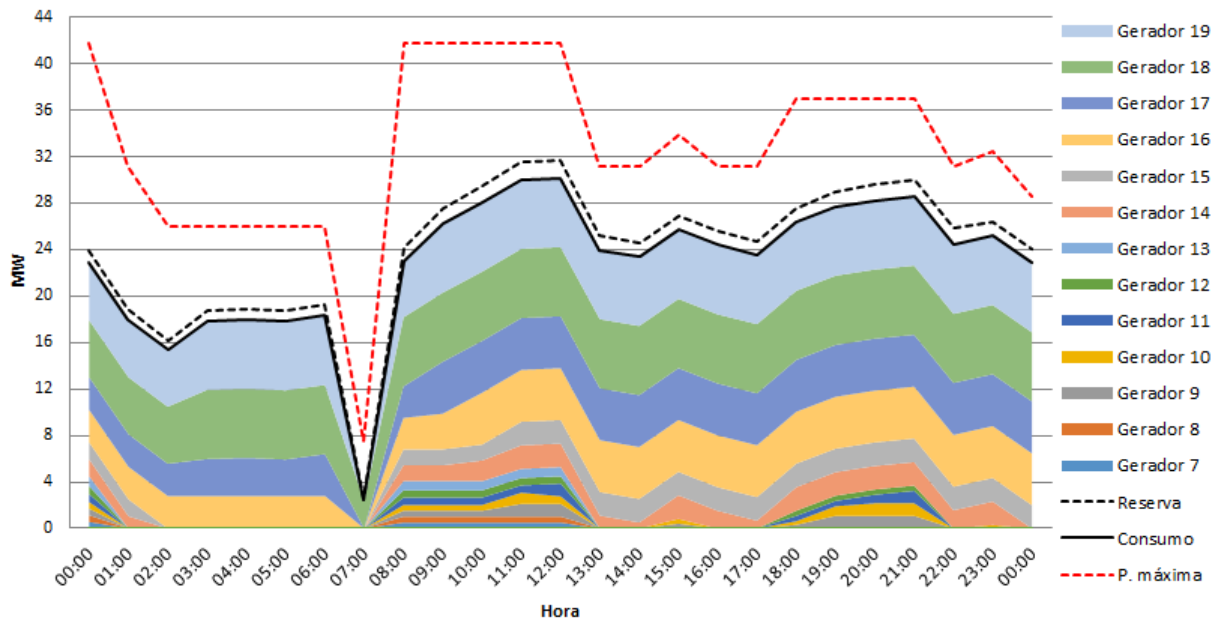


Figura 5.5: Simulação de dia seco, reserva girante a 5%, sem produção renovável

Os valores da potência fornecida por cada um dos geradores são exatamente iguais aos valores do caso testado para a reserva a 5%, até às 11:00 horas. A partir daí, têm de entrar em funcionamento outros geradores, não devido ao valor de consumo, mas para cumprir a restrição da reserva (resultado da superioridade do seu valor, em relação ao anterior). Assim, às 21:00 horas, por exemplo, o gerador 2 é ligado e mantém-se em produção até ao final do dia (fim da simulação). Por comparação com o caso anterior, este gerador nunca chegou a ser ligado.

Na figura 5.6, encontra-se a evolução da produção dos geradores ao longo dia e da soma das potências máximas dos mesmos, assim como a variação do consumo e, consequentemente, da reserva girante.

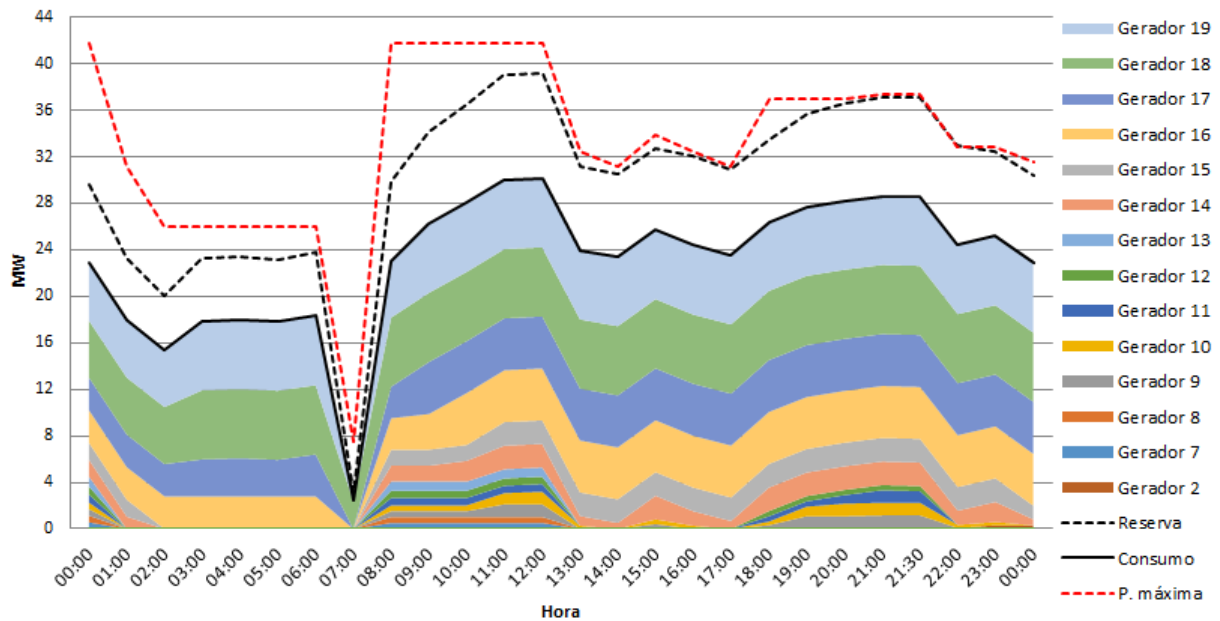


Figura 5.6: Simulação de dia seco, reserva girante a 30%, sem produção renovável

Ao comparar esta figura com a figura 5.5, é possível verificar as semelhanças existentes entre as duas e, ainda, que as diferenças verificadas se devem à diferença entre os valores da reserva utilizados.

Assim, conclui-se que, para além de assegurar que a produção de energia é suficiente face à procura, o Sistema de Despacho (SD) também garante, em todos os casos, que a restrição da reserva girante seja cumprida, ligando (à potência mínima, de modo a reduzir os custos de produção tanto quanto possível), para tal, os geradores de menor rácio económico necessários.

A partir dos resultados registados nas simulações efetuadas no 1º cenário, pode inferir-se que o Sistema de Despacho (SD) implementado permite solucionar o problema do despacho em sistemas energeticamente isolados, quando tem disponíveis no sistema geradores termoelétricos com capacidade para suprir os valores de carga, quer de dias chuvosos quer de dias secos, reduzindo os custos de produção de energia elétrica e consegue assegurar o valor da reserva girante associado, garantindo a segurança da rede elétrica.

5.5 2º Cenário: Produção renovável a 10%

Nesta secção, explicam-se em detalhe as condições em que vai ser efetuado o segundo cenário de teste e demonstram-se os resultados obtidos.

Para o segundo cenário de teste considera-se que coexiste produção convencional e produção renovável, sendo que os valores da produção renovável correspondem a 10% dos valores de consumo. Executa-se todo o processo para os dois diagramas de carga existentes, bem como para os dois valores de reserva girante referidos na secção 5.3.

5.5.1 Dia chuvoso

Para este cenário de teste utilizaram-se os dados de produção quer convencional quer renovável, os dados de consumo associados ao diagrama de carga de um dia tipicamente chuvoso e para a reserva girante os valores correspondentes a 5% e 30% do valor do consumo. Considera-se, ainda, que todos os geradores estão desligados até ao início da execução do processo e, a partir desse momento, os respetivos valores de geração de energia, em cada instante, estão dependentes dos valores calculados pelo algoritmo.

Reserva a 5%

O primeiro caso foi simulado com o valor da **reserva a 5%**.

Para este caso, o procedimento efetuado é, em tudo, semelhante ao utilizado na secção 5.4.1. Desta maneira, para a simulação de um dia tipicamente chuvoso, com a reserva girante a 5% e a produção renovável a 10%, obteve-se o diagrama temporal representado na figura 5.7.

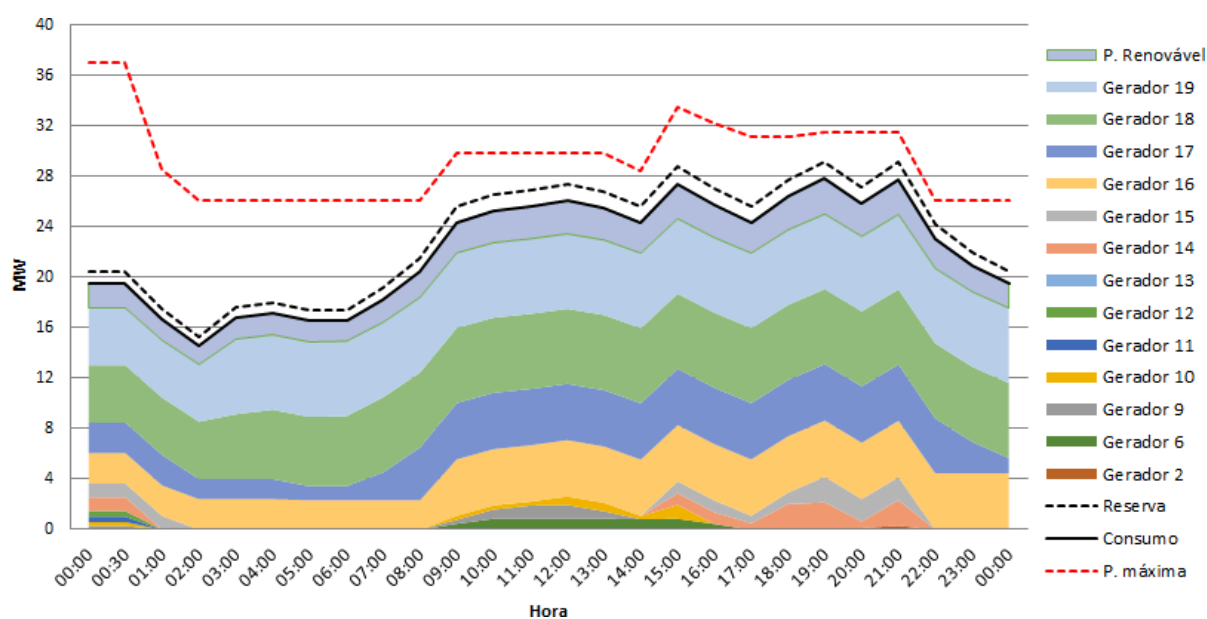


Figura 5.7: Simulação de dia chuvoso, reserva girante a 5%, produção renovável a 10%

Na figura anterior, é possível observar a representação da produção renovável. Em comparação com os resultados obtidos na figura 5.3 (sem produção renovável), verifica-se uma redução dos valores de potência gerados pelos demais geradores. No entanto, a oscilação nos valores do consumo é igual e rigorosamente seguida pela produção e a restrição da reserva girante é, em todos os momentos, cumprida.

Reserva a 30%

O segundo caso foi simulado com o valor da **reserva a 30%**.

Neste caso, o procedimento efetuado é, em tudo, semelhante ao utilizado na secção 5.4.1. Desta maneira, para a simulação de um dia tipicamente chuvoso, com a reserva girante a 30% e a produção renovável a 10%, obteve-se o diagrama temporal presente na figura 5.8.

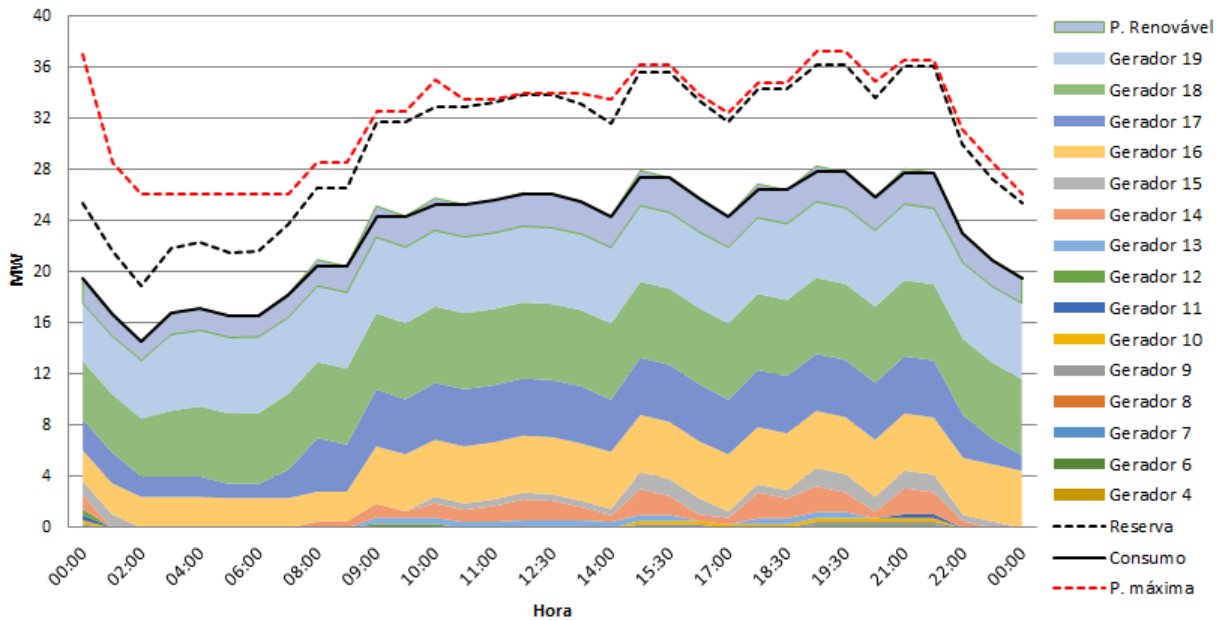


Figura 5.8: Simulação de dia chuvoso, reserva girante a 30%, produção renovável a 10%

Na figura anterior, é possível observar alguns intervalos de tempo cuja produção excede o consumo de energia. Estes correspondem a momentos onde o aumento do consumo levou ao aumento da potência fornecida pelos geradores que já se encontravam em funcionamento para suprir a carga em falta e à ligação de geradores, à potência mínima, para satisfazer a condição imposta pela reserva girante. De referir que nos intervalos de tempo imediatamente posteriores, esse valor de potência em excesso foi corrigido, tendo a produção voltado a seguir rigorosamente o consumo. Para além disso, em comparação com os resultados obtidos na figura 5.4 (sem produção renovável), verifica-se uma redução dos valores da potência fornecida pelos demais geradores, sem comprometer a eficiência dos mesmos.

5.5.2 Dia seco

Para este cenário de teste utilizaram-se os dados de produção quer convencional quer renovável, os dados de consumo associados ao diagrama de carga de um dia tipicamente seco e para a reserva girante os valores correspondentes a 5% e 30% do valor do consumo. Considera-se, ainda, que todos os geradores estão desligados até ao início da execução do processo e, a partir desse momento, os respetivos valores de geração de energia, em cada instante, estão dependentes dos valores calculados pelo algoritmo.

Reserva a 5%

O primeiro caso foi simulado com o valor da **reserva a 5%**.

Para este caso, o procedimento efetuado é, em tudo, idêntico ao utilizado na secção 5.4.2. Desta forma, para a simulação de um dia tipicamente seco, com a reserva girante a 5% e a produção renovável a 10%, obteve-se o diagrama temporal apresentado na figura 5.9.

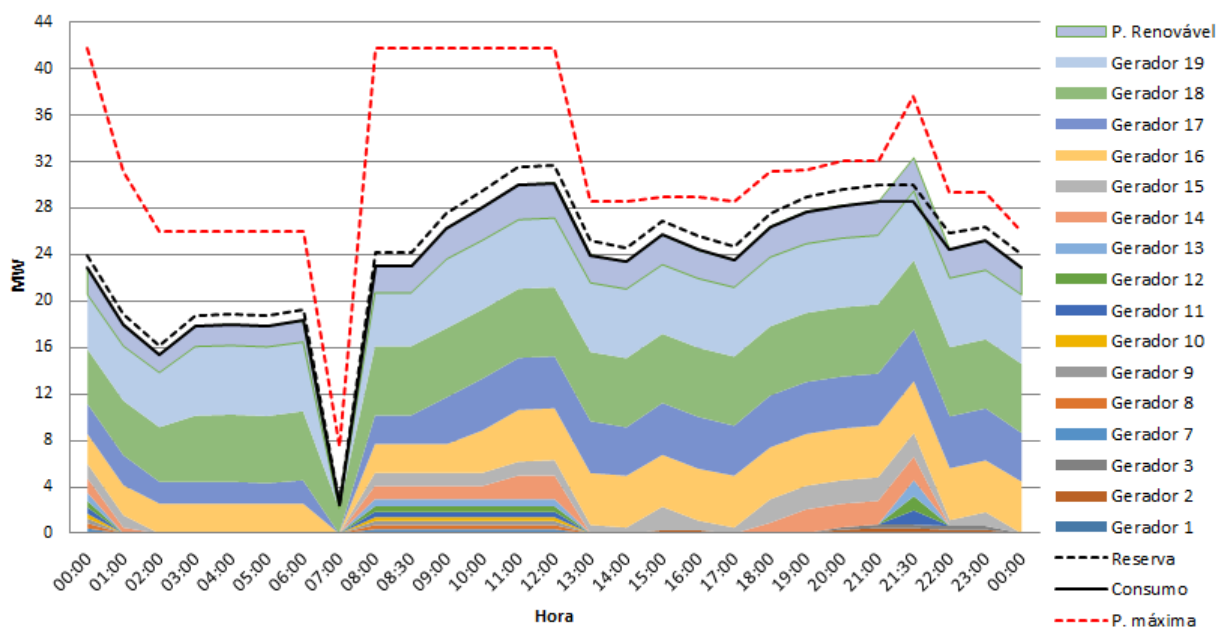


Figura 5.9: Simulação de dia seco, reserva girante a 5%, produção renovável a 10%

Na figura anterior, é possível observar a componente da produção renovável. Em comparação com os resultados obtidos na figura 5.5 (sem produção renovável), verifica-se uma redução dos valores de potência gerados pelos demais geradores. No entanto, como a percentagem da reserva é, neste caso, superior, tornou-se necessário ligar mais geradores para satisfazer a sua condição. Assim, a restrição da reserva girante é, em todos os momentos, cumprida e a oscilação nos valores do consumo é rigorosamente seguida pela produção.

Reserva a 30%

O segundo caso foi simulado com o valor da **reserva a 30%**.

Neste caso, o procedimento efetuado é, em tudo, semelhante ao utilizado na secção 5.4.2. Desta forma, para a simulação de um dia tipicamente seco, com a reserva girante a 30% e a produção renovável a 10%, obteve-se o diagrama temporal representado na figura 5.10.

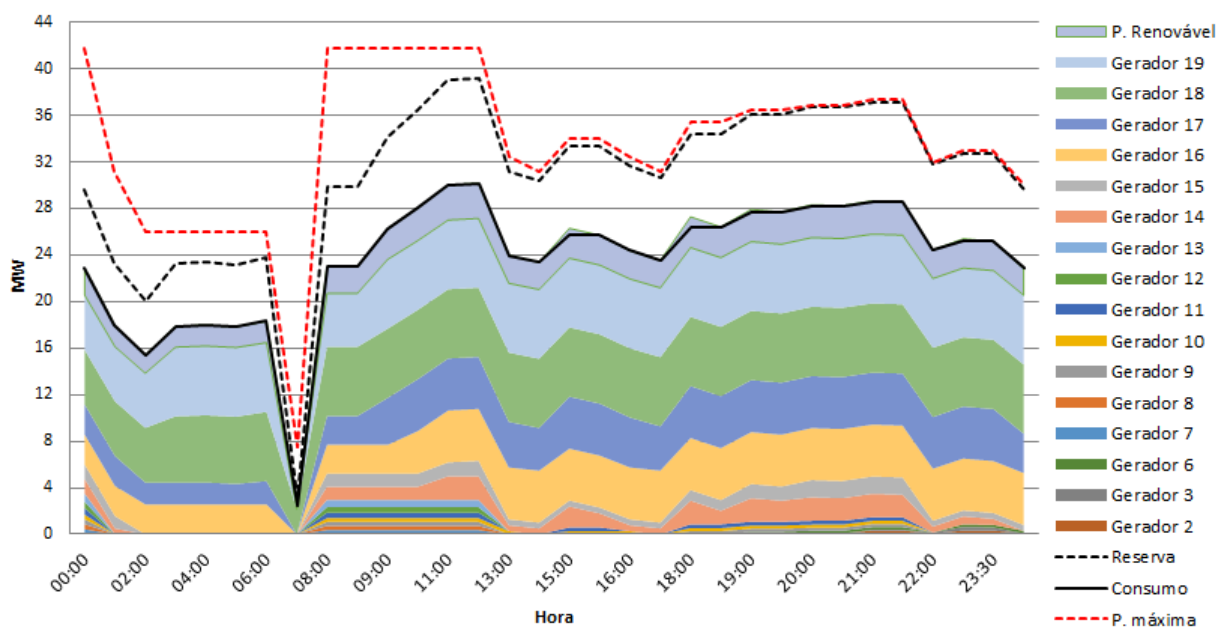


Figura 5.10: Simulação de dia seco, reserva girante a 30%, produção renovável a 10%

Os resultados da figura anterior são idênticos aos registados na figura 5.6 (sem produção renovável). A principal diferença deve-se ao valor superior da reserva girante, para este caso. Deste modo, em alguns períodos de tempo foi necessário ligar geradores para garantir que a restrição imposta pela reserva girante era satisfeita, daí que se observem, no gráfico, instantes de tempo cujo valor da produção de energia excedeu o valor da procura. Excluindo estes pequenos intervalos de tempo, a produção consegue igualar o consumo, através da energia fornecida pelos geradores de menores rácios, fazendo com que o custo de produção seja tão reduzido quanto possível.

Os resultados obtidos pelas simulações efetuadas no 2º cenário permitem afirmar que o Sistema de Despacho (SD) implementado é capaz de solucionar o problema do despacho em sistemas energéticos isolados, quando coexiste produção convencional (proveniente dos geradores termoelétricos existentes) e produção renovável, tanto em dias chuvosos como em dias secos, reduzindo os custos de produção de energia elétrica e consegue assegurar o valor da reserva girante associado, garantindo a segurança da rede elétrica.

5.6 3º Cenário: Produção renovável a 50%

Nesta secção é apresentada uma explicação detalhada das condições em que vai ser efetuado o terceiro cenário de teste e apresentam-se os resultados obtidos.

Para o terceiro cenário de teste considera-se que coexiste produção convencional e produção renovável, sendo que os valores da produção renovável correspondem a 50% dos valores de consumo. Executa-se todo o processo para os dois diagramas de carga existentes, bem como para os dois valores de reserva girante referidos na secção 5.3.

5.6.1 Dia chuvoso

Para este cenário de teste utilizaram-se os dados de produção quer convencional quer renovável, os dados de consumo associados ao diagrama de carga de um dia tipicamente chuvoso e para a reserva girante os valores correspondentes a 5% e 30% do valor do consumo. Considera-se, ainda, que todos os geradores estão desligados até ao início da execução do processo e, a partir desse momento, os respetivos valores de geração de energia, em cada instante, estão dependentes dos valores calculados pelo algoritmo.

Reserva a 5%

O primeiro caso foi simulado com o valor da **reserva a 5%**. Assim, o conjunto de valores iniciais, registados às 0:00 horas é definido por:

$$\text{Produção Convencional} = 0 \text{ MW}$$

$$\text{Consumo} = 19.522 \text{ MW}$$

$$\text{Produção Renovável} = 9.761 \text{ MW}$$

$$\text{Reserva} = 0.9761 \text{ MW}$$

Como o valor do consumo é superior ao valor da produção, o processo vai encaminhar-se para o pré-despacho e, posteriormente, para o despacho económico.

No pré-despacho, começa por se obter o período de tempo durante o qual o valor do consumo se vai manter razoavelmente estável. Para tal, definiu-se um *threshold* de 1 MW. O valor do consumo registado à 1:00 hora foi de 16.666 MW, pelo que a diferença absoluta entre este valor e o valor inicial (2,856 MW) é superior ao *threshold*. Assim, o período de baixa oscilação para o primeiro instante corresponde, exatamente, a uma hora e selecionam-se todos os geradores cujo tempo mínimo de funcionamento, $T_{ON,min}$ não ultrapasse este valor, isto é, todos os geradores cujo $T_{ON,min}$ seja 0.5 ou 1 hora (geradores 7 a 19). De seguida, ordenam-se estes geradores pelo menor rácio económico e efetuam-se todas as combinações possíveis, cuja soma das potências atribuídas seja capaz de suprir a carga necessária (consumo). Após a execução deste método de combinações, verifica-se que todos os geradores anteriores são selecionados para o despacho económico.

Uma vez que os geradores se encontram todos desligados, o processo de despacho económico vai proceder à atribuição de um valor correspondente à potência que estes devem fornecer. Desta forma, começa por se calcular o valor de λ , definido na equação 4.16b ($\lambda \simeq 1.6322$). Quase todos os valores de potência, P_i , calculados segundo a expressão

4.16a, para este λ estão fora dos limites, mínimo e máximo, do gerador. Assim, prossegue-se com o cálculo de novos valores de λ , de acordo com a expressão 4.17. Os novos valores obtidos não permitem obter potências que estejam entre os limites técnicos dos grupos termoeletricos.

O conjunto de geradores selecionados não permite solucionar o problema pelo que, se possível, deve obter-se um novo conjunto. Para tal, verifica-se se, ao retirar do conjunto anterior o gerador com o maior rácio económico, ainda é possível cumprir as restrições impostas. O gerador 7 é o gerador que apresenta o maior rácio económico e, ao ser retirado dos geradores selecionados, não causa qualquer impacto, uma vez que a soma dos valores da potência máxima ideal, $P_{max,ideal}$, dos restantes (32.4656 MW) é superior ao valor de produção necessária (9.761 MW). Por conseguinte, repete-se o procedimento aplicado ao conjunto de geradores anterior. Os valores de λ calculados, para o novo conjunto de geradores, também não permitem solucionar o problema, uma vez que os valores de P_i obtidos não satisfazem as condições impostas pelos geradores.

Assim, retira-se mais um gerador ao conjunto, no sentido de restringir ainda mais os geradores selecionados. O grupo termoeletrico 8 é, então, retirado, uma vez que tem o maior rácio, e o somatório dos $P_{max,ideal}$ dos restantes (31.5056 MW) é, ainda, superior ao valor necessário de produção convencional (9.761 MW). Para este novo conjunto, calculam-se os novos valores de λ e os respetivos P_i . Apesar do λ calculado pela equação 4.16b não resultar em valores válidos de P_i , o λ obtido na iteração seguinte ($\simeq 1.7913$) pela expressão 4.17 permite alcançar valores de P_i que satisfaçam as restrições técnicas dos geradores. Para cada gerador, o valor da potência a gerar, P_i , calculado é:

$P_9 = 0.9630 \text{ MW}$	$P_{15} = 2.0149 \text{ MW}$
$P_{10} = 0.9630 \text{ MW}$	$P_{16} = 3.3877 \text{ MW}$
$P_{11} = 1.0707 \text{ MW}$	$P_{17} = 3.3877 \text{ MW}$
$P_{12} = 1.0707 \text{ MW}$	$P_{18} = 5.4493 \text{ MW}$
$P_{13} = 1.2411 \text{ MW}$	$P_{19} = 5.4493 \text{ MW}$
$P_{14} = 2.0149 \text{ MW}$	

A soma dos valores anteriores é de 27.0123 MW, isto é, é um valor bastante superior à produção convencional necessária (9.761 MW). No entanto, tendo em conta as características técnicas dos geradores termoeletricos e a condição da reserva girante, foi necessário proceder à ligação de todos estes geradores. O somatório da potência máxima de cada um dos geradores anteriores é 30.382 MW, valor superior à soma do valor de consumo com o valor da reserva girante (20.4981 MW). Deste modo, estão cumpridas as restrições, quer do sistema quer dos geradores, para este intervalo de tempo.

Após este intervalo de tempo, efetuou-se o procedimento utilizado na secção 5.4.1, tendo resultado no diagrama temporal da figura 5.11.

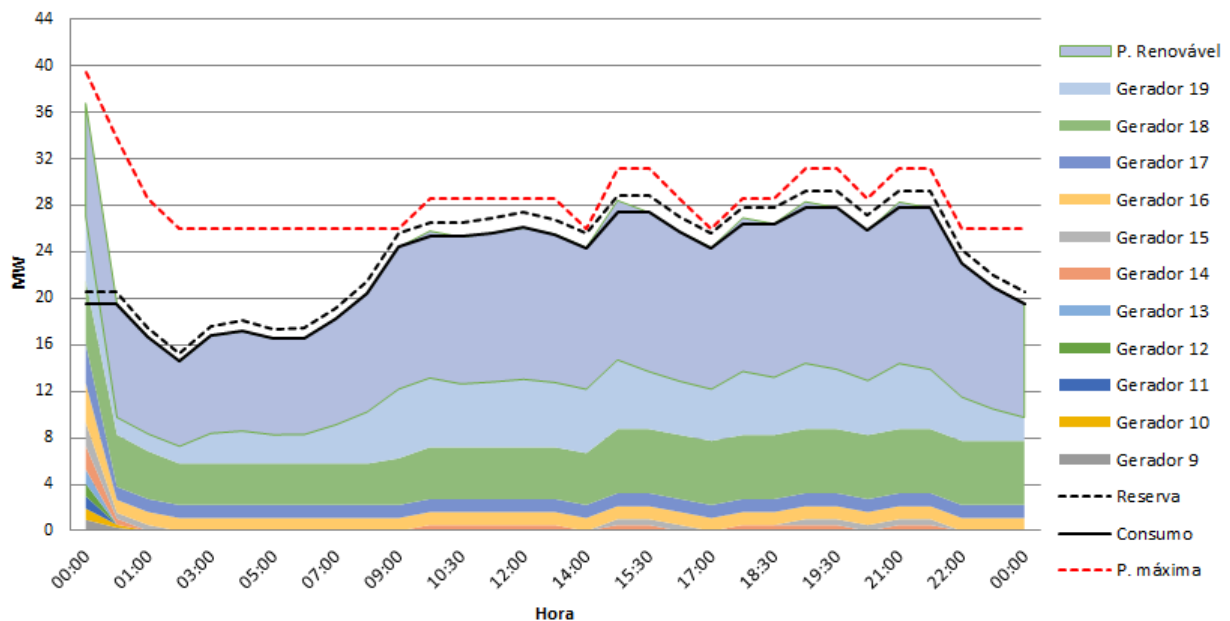


Figura 5.11: Simulação de dia chuvoso, reserva girante a 5%, produção renovável a 50%

Da análise da figura anterior, é possível constatar a situação inicial referida anteriormente. No entanto, é também visível que, ao fim de trinta minutos, foram efetuados os ajustes necessários para o valor da produção ser exatamente igual ao do consumo. Para além disto, deve, ainda, atentar-se na componente significativa da produção renovável e o forte impacto que provoca nos valores da potência fornecida pelos geradores termoeletricos. Por comparação com os resultados obtidos na figura 5.3 (sem produção renovável), observam-se alguns instantes de tempo em que o consumo é ligeiramente inferior à produção. Este facto deve-se à restrição da reserva girante e à consequente necessidade de ligar geradores apenas para garantir o seu cumprimento. À exceção destes pequenos períodos de tempo, o valor da produção iguala o valor do consumo.

Reserva a 30%

O segundo caso foi simulado com o valor da **reserva a 30%**.

Neste caso, o procedimento efetuado é, em tudo, semelhante ao utilizado na secção anterior 5.6.1. Os geradores previamente seleccionados no pré-despacho não conseguiram, para nenhum valor de λ , satisfazer as restrições técnicas dos mesmos. Assim, foi-se retirando o gerador com maior rácio económico de cada conjunto, numa tentativa de encontrar o conjunto-solução para o problema que satisfizesse todas as restrições impostas. Assim, obteve-se o mesmo conjunto de geradores da secção 5.6.1 e os respetivos valores de potência que deverão fornecer. Desta forma, para a simulação de um dia tipicamente chuvoso, com a reserva girante a 30% e a produção renovável a 50%, obteve-se o diagrama temporal apresentado na figura 5.12.

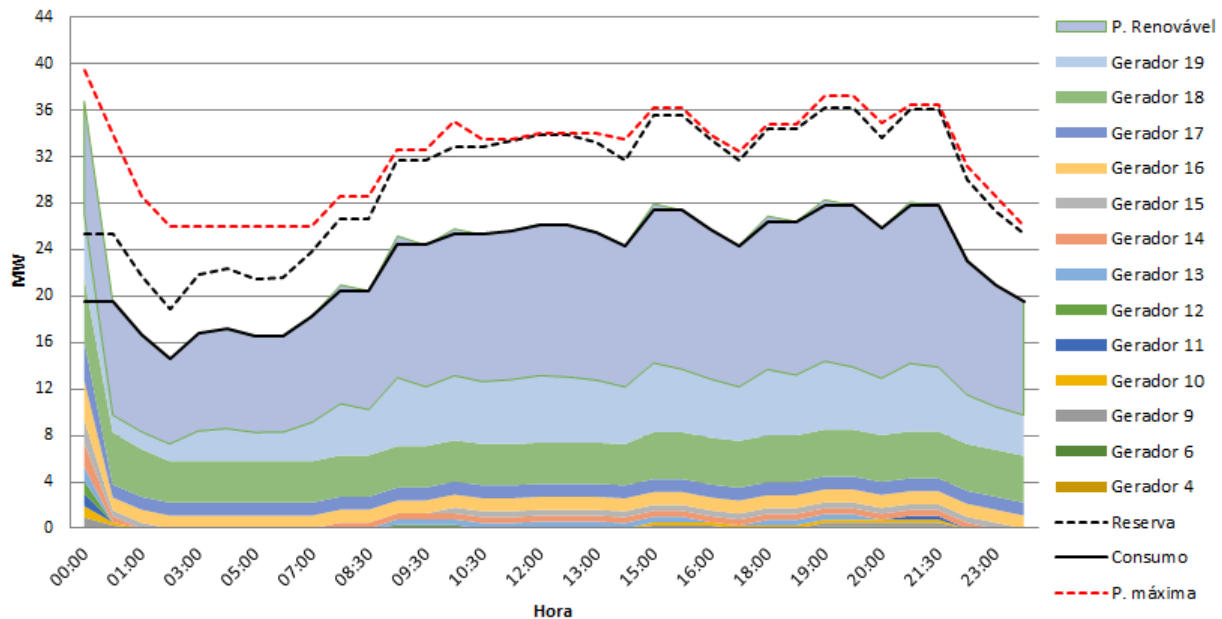


Figura 5.12: Simulação de dia chuvoso, reserva girante a 30%, produção renovável a 50%

Ao analisar o diagrama presente na figura anterior, é possível constatar as semelhanças com o diagrama da figura 5.11. O excesso de produção verificado no instante inicial deve-se ao reduzido valor da produção térmica necessária (50%, comparado com o valor de consumo) e ao elevado valor da reserva. Os restantes excessos de produção ocorrem em situações onde é necessário ligar mais geradores para se cumprir a restrição reserva girante. Na maioria dos períodos de tempo, o valor da produção acompanha justamente a evolução do consumo horário.

5.6.2 Dia seco

Para este cenário de teste utilizaram-se os dados de produção quer convencional quer renovável, os dados de consumo associados ao diagrama de carga de um dia tipicamente seco e para a reserva girante os valores correspondentes a 5% e 30% do valor do consumo. Considera-se, ainda, que todos os geradores estão desligados até ao início da execução do processo e, a partir desse momento, os respetivos valores de geração de energia, em cada instante, estão dependentes dos valores calculados pelo algoritmo.

Reserva a 5%

O primeiro caso foi simulado com o valor da **reserva a 5%**.

Para este caso, o procedimento efetuado é, em tudo, idêntico ao utilizado na secção 5.4.2. Desta forma, para a simulação de um dia tipicamente seco, com a reserva girante a 5% e a produção renovável a 10%, obteve-se o diagrama temporal apresentado na figura 5.9.

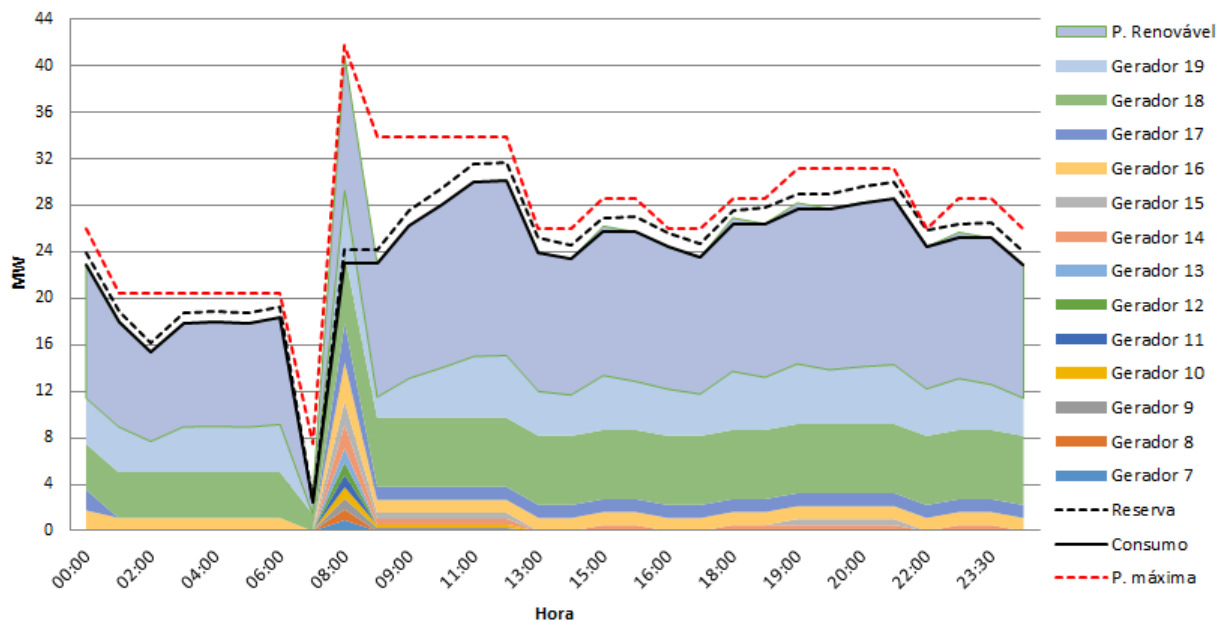


Figura 5.13: Simulação de dia seco, reserva girante a 5%, produção renovável a 50%

Na figura anterior, é possível observar a componente significativa da produção renovável. Em comparação com os resultados obtidos na figura 5.5 (sem produção renovável), verifica-se uma redução considerável dos valores de potência gerados pelos geradores. No entanto, como a percentagem da reserva é, neste caso, superior, tornou-se necessário ligar mais geradores para satisfazer a sua condição (como por exemplo às 8:00, onde o valor de produção excede bastante o valor da procura de energia). Assim, a restrição da reserva girante é, em todos os momentos, cumprida e a oscilação nos valores do consumo é, na maioria do tempo, rigorosamente seguida pela produção.

Reserva a 30%

O segundo caso foi simulado com o valor da **reserva a 30%**.

Neste caso, o procedimento efetuado é, em tudo, semelhante ao utilizado na secção 5.6.2. Desta forma, para a simulação de um dia tipicamente seco, com a reserva girante a 30% e a produção renovável a 50%, obteve-se o diagrama temporal representado na figura 5.14.

Os resultados da figura 5.14 são idênticos aos registados na figura 5.13. A principal diferença deve-se ao valor superior da reserva girante, para este caso. Deste modo, em alguns períodos de tempo foi necessário ligar geradores para garantir que a restrição imposta pela reserva girante era satisfeita, daí que se observem, no gráfico, instantes de tempo cujo valor da produção de energia excedeu ligeiramente o valor da procura. Excluindo estes pequenos intervalos de tempo, a produção consegue igualar o consumo, através da energia fornecida pelos geradores de menores rácios, fazendo com que o custo de produção seja tão reduzido quanto possível.

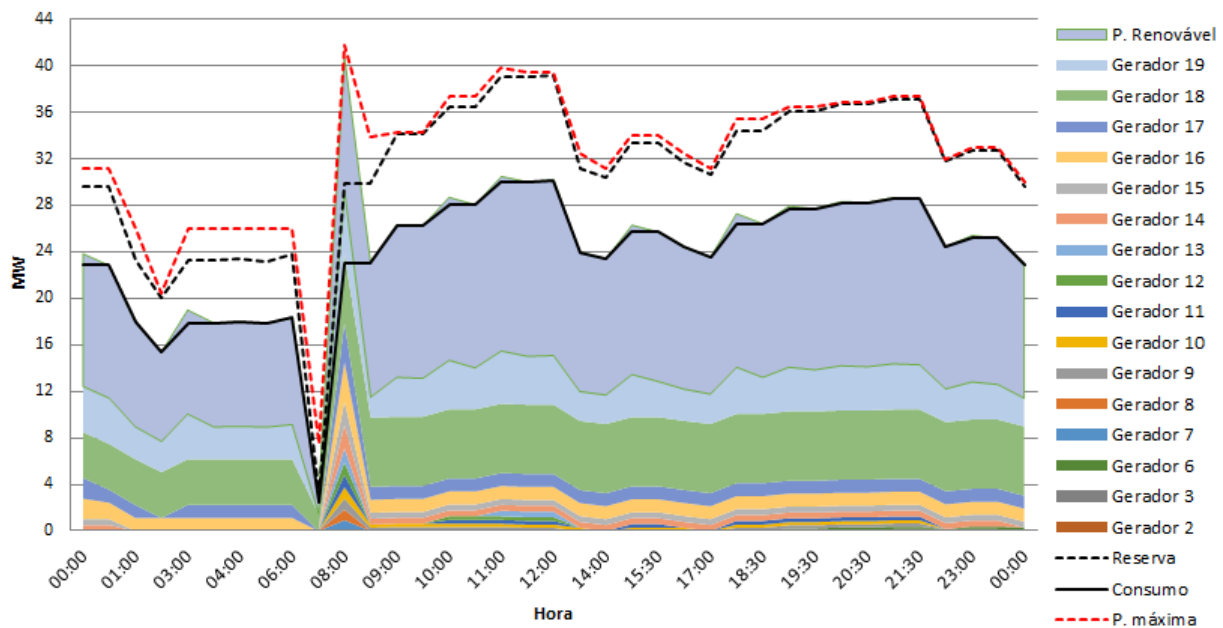


Figura 5.14: Simulação de dia seco, reserva girante a 30%, produção renovável a 50%

Os resultados obtidos pelas simulações efetuadas no 3º cenário permitem afirmar que o Sistema de Despacho (SD) implementado é capaz de solucionar o problema do despacho em sistemas isolados energeticamente, quando coexiste produção convencional (proveniente dos geradores termoeletrônicos existentes) e produção renovável significativa, quer em dias tipicamente chuvosos como em dias secos, reduzindo os custos de produção de energia elétrica e consegue assegurar o valor da reserva girante associado, garantindo a segurança da rede elétrica.

Capítulo 6

Conclusão e Trabalho Futuro

Este capítulo contém as conclusões relativas ao desenvolvimento, implementação e teste do Sistema de Despacho (SD). São, ainda, referidas algumas sugestões em termos de trabalho futuro e da continuidade do projeto.

6.1 Conclusão

A energia elétrica é um serviço, atualmente, indispensável para a sociedade. Com os avanços da tecnologia, o aumento da população mundial e o consequente aumento exponencial do consumo de eletricidade, surgiram problemas relacionados com a qualidade da energia e a segurança da rede elétrica.

Os combustíveis fósseis constituem uma quota-parte bastante significativa na produção de energia elétrica em todo o mundo, o que causa variados problemas. Para além do seu custo elevado e dos graves impactos ambientais que provocam, em sistemas isolados energeticamente, particularmente, estes têm de ser importados, o que impede a competitividade do país tanto no mercado interno como no mercado externo. Assim, torna-se necessário aumentar a integração de fontes de energia renovável na produção de energia elétrica, no sentido de reduzir os custos de produção, os impactos ambientais e aumentar o potencial económico do país.

Apesar de reduzirem os impactos causados pelos problemas enunciados anteriormente, as energias renováveis trazem outro tipo de problemas, como oscilações ao nível da frequência e da tensão da rede. No entanto, estes podem ser solucionados pela gestão e controlo, em tempo real, da produção convencional. Portanto, criou-se um sistema que efetua o balanço de energia, entre a produção e a procura da mesma, regulando a produção de energia convencional, com um custo de produção tanto reduzido quanto possível, cumprindo, em qualquer situação, quer as restrições do sistema, quer dos geradores termoelétricos (geradores que produzem a energia convencional/térmica). Este sistema denomina-se **Sistema de Despacho (SD)**.

O processo de despacho referido pode dividir-se, essencialmente, em três microprocessos:

Pré-Despacho Processo desencadeado pela insuficiência de produção convencional, face ao consumo horário. Tem como objetivo restringir o conjunto dos geradores existentes no sistema, com base nas suas especificações técnicas, tais como o tempo mínimo de funcionamento e os limites, mínimo e máximo, de produção dos geradores.

Despacho Económico Processo executado caso hajam geradores selecionados no processo de pré-despacho. Atribui valores de produção a cada um dos geradores selecionados anteriormente, recorrendo ao método dos Multiplicadores de *Lagrange* e ao Método Iterativo de *Lambda*.

Desligamento/Redução de potência Processo que ocorre se o valor de produção convencional exceder o necessário para satisfazer as necessidades de consumo. Verifica se é possível desligar algum dos geradores em funcionamento no momento de execução do processo e, caso contrário, averigua a possibilidade de reduzir a potência fornecida por algum desses geradores, de acordo com o que é mais economicamente viável.

O processo de despacho foi implementado recorrendo à linguagem de programação Java. Para atestar a sua eficiência e adequabilidade, criaram-se vários cenários de teste com o objetivo de simular a execução do processo de despacho durante um dia. Para tal, fizeram-se todas as combinações entre os dados de produção convencional e renovável (0%, 10% e 50% do valor de consumo), os dados de consumo (dia chuvoso e dia seco) e os valores de reserva girante (5% e 30% do valor do consumo).

Os dados resultantes da execução do processo de despacho foram bastante satisfatórios. Para cada simulação efetuada, todas as restrições do sistema e dos geradores foram cumpridas:

Restrição do balanço de potência Produção não inferior ao consumo.

Restrição da reserva girante Somatório das potências máximas dos geradores em funcionamento não inferior à soma do consumo com o valor da reserva.

Restrição dos limites de funcionamento dos geradores Potência fornecida entre limites mínimo e máximo do gerador.

Para além disso, sempre que necessário, aumentou-se a potência ou ligaram-se os geradores com os menores rácios económicos. Por oposição, sempre que possível, reduziu-se a potência ou desligaram-se os geradores com os maiores rácios económicos. Desta forma, garantiu-se, em todas as situações, que os geradores em funcionamento eram os que tinham menor rácio económico e estavam a ser explorados da forma mais eficiente possível, assegurando, assim, a diminuição dos custos de produção de energia a um valor tão reduzido quanto possível.

Os resultados obtidos aquando da execução do processo de despacho para os cenários descritos anteriormente, permite concluir que o Sistema de Despacho (SD) desenvolvido é capaz de:

- Maximizar a exploração e produção dos parques eletroprodutores, nomeadamente, das Centrais de Produção de Energia (CPE) térmica, com um custo tanto reduzido quanto possível;
- Gerir a produção convencional/térmica de energia, em tempo real, com base na previsão do consumo de energia elétrica;
- Maximizar a segurança do sistema e da rede elétrica (assegurar restrição da reserva girante).

6.2 Trabalho Futuro

Ao nível do trabalho futuro, há diversas formas de melhorar o sistema desenvolvido.

Em primeiro lugar, o algoritmo executado pelo microprocesso de despacho económico deve ser afinado para impedir os pequenos excessos de produção verificados em alguns dos instantes de tempo, causados pela restrição da reserva girante, em certos cenários de simulação.

O processo de despacho económico, quando procede à ligação de geradores com o mesmo rácio económico, atribui-lhes a mesma potência. Os algoritmos quer de aumento quer de redução de potência devem ser otimizados também nesse sentido. Assim, dois geradores com as mesmas especificações técnicas estarão sempre a fornecer quantidades iguais de energia, podendo ser vistos como um subconjunto de geradores que deverá ser ajustado como se de um só se tratasse.

De modo a cumprir o tempo mínimo de paragem do gerador, o processo de despacho económico deve ser melhorado, tendo em conta esta característica.

O despacho económico pode, ainda, ser otimizado, recorrendo à integração, na função de *Lagrange*, das restrições de desigualdade descritas na secção 4.3.3, nomeadamente, a restrição da reserva girante e a restrição dos limites de funcionamento dos geradores. Para tal, recomenda-se que sejam utilizadas as condições de *Karush–Kuhn–Tucker* [38]. Desta forma, os valores de potência atribuídos a cada gerador contemplam todas restrições e, à partida, não será necessário efetuar verificações adicionais ou recorrer ao método iterativo de *lambda*.

Por último, recomenda-se que o algoritmo de pré-seleção de geradores seja revisto, assim como a expressão do rácio económico, com o objetivo de aperfeiçoar o microprocesso do pré-despacho.

Bibliografia

- [1] Revolução Industrial. <http://www.historiadetudo.com/revolucao-industrial.html>. Acedido a 2014.02.21.
- [2] Aumenta consumo mundial de combustíveis fósseis. <http://www.dw.de/aumenta-consumo-mundial-de-combust%C3%ADveis-f%C3%B3sseis/a-16654031>. Acedido a 2014.02.20.
- [3] João A. Peças Lopes. Oferta e eficiência energética em sistemas eléctricos. *Gazeta de Física*, 29:86–90, 2006.
- [4] Comhairle nan Eilean Siar - The Outer Hebrides of Scotland. Pacto das Ilhas, 2010.
- [5] Parlamento Europeu. Declaração escrita, apresentada nos termos do artigo 123.º do Regimento do Parlamento Europeu, sobre as estratégias regionais em matéria de energias renováveis nas ilhas da União Europeia.
- [6] Theodore H. Bullock. *Electroreception*. Springer, 2005.
- [7] James Srodes. *FRANKLIN: The Essencial Founding Father*. Regnery Publishing, 2002.
- [8] J. P. Sucena Paiva. *Redes de Energia Eléctrica - Uma Análise Sistémica*. IST Press, 2011.
- [9] Factory system - History of Factory System in the United States. http://iah201veenstra.a.wiki-site.com/index.php/Factory_system. Acedido a 2014.02.21.
- [10] C. Peter Chen. Battle of Stalingrad. *The European War*, 2006.
- [11] Revolução Energética. http://www.a-nossa-energia.edp.pt/mais_melhor_energia/revolucao_energetica.php. Acedido a 2014.02.21.
- [12] Aumento da população mundial está a contribuir para agravamento da crise da água. <http://www.unric.org/pt/actualidade/22742>. Acedido a 2014.02.21.
- [13] Electric power consumption (kWh per capita). <http://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.ELEC.KH.PC?page=6>. Acedido a 2014.07.22.

- [14] Edmilson Mendes Cardoso. Simulação de sistemas energéticos isolados. Ilha de Santiago. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2011.
- [15] Quase 60% da electricidade consumida em 2013 foi de origem renovável. <http://www.publico.pt/ecosfera/noticia/quase-60-da-electricidade-consumida-em-2013-foi-renovavel-1619592>. Acedido a 2014.07.22.
- [16] Electricidade. <http://www.erse.pt/pt/electricidade/Paginas/default.aspx>. Acedido a 2014.02.21.
- [17] Fernando Faria, Luís Cruz e Pires Barbosa. *A Central Tejo: a fábrica que electrificou Lisboa*. Editorial Bizâncio; Museu da Electricidade, 2007.
- [18] Central Tejo: Baixa Pressão (1914-1938) - VI Parte. [http://wikienergia.com/~edp/index.php?title=Central_Tejo:_Baixa_Press%C3%A3o_\(1914-1938\)_-_VI_Parte](http://wikienergia.com/~edp/index.php?title=Central_Tejo:_Baixa_Press%C3%A3o_(1914-1938)_-_VI_Parte). Acedido a 2014.07.04.
- [19] Gesto Energy Consulting. Plano Energético Renovável Cabo Verde, 2011.
- [20] Jair José Lopes Delgado. Sistema de Informação de Apoio à Detecção de Perdas de Energia Eléctrica – O Caso da Electra. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2010.
- [21] Net electricity generation, EU-27, 2010 (% of total, based on GWh). [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php?title=File:Net_electricity_generation,_EU-27,_2010_\(%25_of_total,_based_on_GWh\).png&filetimestamp=20121012130734](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php?title=File:Net_electricity_generation,_EU-27,_2010_(%25_of_total,_based_on_GWh).png&filetimestamp=20121012130734). Acedido a 2014.02.24.
- [22] Heleno da Luz Monteiro Sanches. Optimização do Despacho e Reserva Girante em Sistemas Eléctricos Híbridos. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [23] Centro de Despacho. <http://www.edpr.com/pt-pt/negocio/inovacao/centro-de-despacho/>. Acedido a 2014.02.24.
- [24] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE). Regulamento de Relações Comerciais do Setor Elétrico, 2012.
- [25] Electricidade. <https://www.ren.pt/media/imagens/>. Acedido a 2014.02.25.
- [26] Automação. http://www.efacec.pt/PresentationLayer/efacec_competencias_00.aspx?idioma=1&area=2&local=58. Acedido a 2014.02.25.
- [27] País vai ter a primeira rede elétrica de alta tensão. http://www.embcv.pt/lista_conteudos_sub.asp?idcont=2458&idarea=4&idsub=786. Acedido a 2014.02.25.

- [28] Laboratório Redes Elétricas Inteligentes e Veículos Elétricos. <http://reive.inescporto.pt/pt/laboratorio>. Acedido a 2014.07.08.
- [29] Redes Inteligentes o Smart Grids. http://www.energiarenegunak.com/redes_inteligentes.html. Acedido a 2014.02.25.
- [30] Miguel Osório Areias. Scada in a cloud-based architecture. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 2013.
- [31] Central da ilha de Santiago (Praia) - Central de Produção Térmica. http://www.winenergysa.com/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&id=128&Itemid=279&lang=pt. Acedido a 2014.07.07.
- [32] Parque Eólico de Santiago: Bons ventos precisam-se. <http://noticias.sapo.cv/info/artigo/1195458.html>. Acedido a 2014.07.07.
- [33] Primeira Central Fotovoltaica de Cabo verde Inaugurada na Ilha do Sal. http://www.rtc.cv/index.php?id_cod=1498&paginas=21. Acedido a 2014.07.07.
- [34] Sayeed Salam. Unit Commitment Solution Methods. *International Science Index*, 1(11), 2007.
- [35] Encyclopedia of Mathematics. Lagrange multipliers. http://www.encyclopediaofmath.org/index.php?title=Lagrange_multipliers&oldid=24258. Acedido a 2014.05.12.
- [36] Felipe Pereira da Costa. Aplicações de técnicas de optimização a problemas de planeamento operacional de lavra em minas a céu aberto. Tese de Mestrado, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2005.
- [37] Yogesh Sharma e Kuldeep Kumar Swarnkar. Power System Generation Scheduling and Optimization Using Fuzzy Logic Technique. *International Journal of Computational Engineering Research*, 3(4), 2013.
- [38] A. E. Bryson e Yu-Chi Ho. *Applied Optimal Control: Optimization, Estimation, and Control*. Hemisphere Publishing Corporation, 1975.

Apêndice A

Dedução matemática do método dos Multiplicadores de *Lagrange*

Definição

O método dos Multiplicadores de *Lagrange* permite resolver problemas onde se pretende minimizar uma função objetivo sujeita a restrições de igualdade, através da construção da função de *Lagrange*. Esta função é constituída pela soma da função objetivo com as suas restrições, onde cada restrição é multiplicada por um λ , denominado **multiplicador de *Lagrange***.

Função objetivo de minimização

A função objetivo de minimização (função de custo de produção total, C_T) para o problema do despacho económico é dada pela equação 4.10, sendo que a função de custo de produção do gerador i , $C_i(P_i)$, quando fornece a potência P_i , é dada pela expressão 4.3.

$$C_T = \sum_{i=1}^n C_i(P_i) \quad (4.10)$$

$$C_i(P_i) = a_i \times P_i^2 + b_i \times P_i + c_i \quad (4.3)$$

Esta função de minimização está sujeita a uma restrição de igualdade, descrita de seguida.

Restrição do balanço de potência

A restrição está relacionada com o balanço de potência e refere que a soma da potência gerada por cada gerador deve ser igual à carga a suprir, da qual se obtém a equação 4.11.

$$P_D - \sum_{i=1}^n P_i = 0 \quad (4.11)$$

Função de *Lagrange* do despacho económico

Definidas todas as equações relevantes, é possível definir a função de *Lagrange* aplicada ao contexto do problema de despacho económico.

Portanto, a função de *Lagrange* será constituída pela função objetivo de minimização da equação 4.10 e pela restrição do balanço de potência definida na equação 4.11, pelo que se obtém a função da equação 4.14.

$$\mathcal{L}(P_i, \lambda) = \sum_{i=1}^n C_i(P_i) + \lambda[P_D - \sum_{i=1}^n P_i] \quad (4.14)$$

Derivadas parciais em ordem a P_i e λ

Após a definição da função de *Lagrange*, é necessário obter as derivadas parciais dessa mesma função, em ordem às variáveis do sistema, e igualá-las a zero, com o fim de se minimizar a função pretendida. Neste caso, derivou-se a função em ordem a P_i e λ , tendo-se obtido as derivadas presentes nas equações 4.15a e 4.15b, respetivamente.

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_i} = \frac{\partial C_T}{\partial P_i} - \lambda = 0 \quad (4.15a)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda} = P_D - \sum_{i=1}^n P_i = 0 \quad (4.15b)$$

Obtenção da função de P_i

Para obter a função de P_i , é necessário resolver a equação 4.15a, como descrito de seguida.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_T}{\partial P_i} - \lambda = 0 &\Leftrightarrow 2a_i P_i + b_i - \lambda = 0 \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow 2a_i P_i = \lambda - b_i \Leftrightarrow P_i = \frac{\lambda - b_i}{2a_i} \end{aligned}$$

Obtenção da função de λ

Para obter a função de λ , deve substituir-se a função de P_i anterior na derivada parcial em ordem a λ (equação 4.15b), como detalhado a seguir.

$$\begin{aligned} P_D - \sum_{i=1}^n P_i &= 0 \Leftrightarrow P_D - \sum_{i=1}^n \frac{\lambda - b_i}{2a_i} = 0 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \sum_{i=1}^n \frac{\lambda}{2a_i} - \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{2a_i} &= P_D \Leftrightarrow \lambda \sum_{i=1}^n \frac{1}{2a_i} = P_D + \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{2a_i} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \lambda &= \frac{P_D + \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{2a_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2a_i}} \end{aligned}$$

Assim, obtiveram-se as funções de P_i e λ que permitem, no processo de despacho económico, calcular a potência que cada gerador deve fornecer, em cada momento.

